

物理学実験 A

富山大学大学院理学部物理学科
栗本猛¹, 兼村晋哉²

平成 18 年 10 月 2 日

¹連絡先 : 理学部 1 号館 A218 号室 (076-445-6588), E-mail : krmt@sci.u-toyama.ac.jp

²連絡先 : 理学部 1 号館 A227 号室 (076-445-6584), E-mail : kanemu@sci.u-toyama.ac.jp

目次

I	はじめに	6
i	物理学実験 A の目的	6
ii	実験題目およびテキスト	6
iii	実験の実施方法	6
iv	服装、持ち物等	7
v	実験室での事故防止等	7
vi	レポート作成について	7
vi.1	レポートを書くための基本事項	7
vi.2	レポートに書くべきこと。書くべきでないこと。	8
vi.3	最後に	9
vii	直接測定と間接測定	9
viii	有効数字	9
viii.1	有効数字の計算	10
ix	誤差の取り扱い	11
ix.1	測定と誤差	11
ix.2	誤差の評価	12
実験 1	オシロスコープ	16
1	目的	16
2	解説	16
2.1	陰極線	16
2.2	オシロスコープ	16
3	装置	17
3.1	陰極線の性質	17
3.2	オシロスコープの使い方	17
4	実験	17
4.1	陰極線の性質	17
4.2	オシロスコープ	17
実験 2	インピーダンス	20
1	目的	20
2	理論	20
3	装置	21
4	実験	21
4.1	実験 I オイルコンデンサー	21
4.2	実験 II 電解コンデンサー	21

4.3	実験 III チョークコイル	22
5	課題	22
実験 3	熱電対	23
1	目的	23
2	理論	23
2.1	熱電対	23
2.2	金属の融解と凝固	24
3	装置	24
4	実験	24
4.1	スズの冷却曲線の作成	24
4.2	熱起電力と温度の関係を表わすグラフの作成	25
4.3	自分の指先の温度の測定	26
5	問題	26
実験 4	ボルダの振り子	27
1	目的	27
2	理論	27
3	実験方法	27
4	注意	27
実験 5	金属の電気抵抗	29
1	目的	29
2	電気抵抗の理論	29
2.1	オームの法則と抵抗率	29
2.2	金属の電気抵抗の温度変化	29
3	装置	29
4	実験	29
4.1	オームの法則	29
4.2	金属線の電気抵抗の測定と抵抗率の算出	30
5	金属線の電気抵抗の温度変化の測定	30
6	課題	31
7	補足	31
8	参考文献	31
実験 6	液体の比熱	32
1	目的	32
2	比熱の定義と測定原理	32
3	実験装置と実験方法	33
4	データの解析	34
実験 7	レーザー光の回折	35
1	目的	35
2	解説	35

2.1	レーザー光 (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)	35
3	装置	36
4	実験	36
4.1	レーザー光の拡がり角をもとめる	36
4.2	単スリットを用いてレーザー光の波長をもとめる	37
4.3	波長のわかったレーザー光を用いて回折格子の間隔を決める	37
4.4	2次元格子をレーザー光で調べ、 x 方向と y 方向の格子定数 a , b を求める	38
4.5	レーザー光を利用して距離を計測する	38
4.6	課題	38
実験 8	Newton リング	39
1	目的	39
2	理論	39
3	装置	40
4	実験前の準備	40
5	注意	40
6	実験	40
6.1	実験 I	40
6.2	実験 II	41
7	参考	41
実験 9	光の屈折	42
1	目的	42
2	理論	42
3	実験	42
3.1	実験準備	42
3.2	全反射から屈折率を求める	43
3.3	入射角と屈折角から屈折率を求める	43
3.4	終わり方	43
4	課題	43
5	参考文献	43
実験 10	半導体の電気抵抗	44
1	目的	44
2	測定方法	44
3	エネルギーギャップの算出	44
4	問題	45
5	付録 (片対数グラフの使い方)	45
実験 11	半導体素子の実験	46
1	目的	46
2	理論	46
2.1	金属と半導体	46
2.2	真性半導体、n 型半導体、p 型半導体	46

2.3	ダイオード	46
2.4	トランジスタ	47
3	実験	48
3.1	ダイオードの電流-電圧特性の測定	48
3.2	ダイオードの整流作用の観察	48
3.3	エミッタ接地の場合のトランジスタの静特性の測定	49
4	課題	49
実験 12 フランクヘルツの実験		50
1	目的	50
2	測定原理	50
3	実験	50
4	解析	51
実験 13 光電効果		52
1	目的	52
2	理論	52
2.1	光電管	52
2.2	光電管	52
2.3	阻止電圧	52
3	装置	53
3.1	フィルターの特性	53
3.2	電気回路	53
4	実験	53
4.1	実験の準備	53
4.2	光電流と逆電圧の関係の測定	54
4.3	阻止電圧の算出	54
5	考察	55
実験 14 地磁気の測定		56
1	目的	56
2	理論	56
2.1	MH を求める実験	56
2.2	M/H を求める実験	56
3	実験	57
3.1	MH を求める。	57
3.2	M/H を求める。	58
3.3	M と H を求める。	58
実験 15 クント (Kundt) の実験		59
1	目的	59
2	原理	59
3	実験	59
3.1	クントの実験	59

3.2	笛の音波と定常波の観察	60
3.3	交流の定常波の観察	61

I はじめに

i 物理学実験 A の目的

物理学実験 A の目的を箇条書にすると次のようになる。

1. 講義で学習してきた物理法則等を、自分の手で、自分の目で、即ち、自分の体で確認する。
2. 自分自身でデータを取り、整理することにより、単なる物理公式だったものを、自分の体験ないし経験とする。
3. そのような過程で具体的には、次のことを習得する。
 - データのまとめ方
 - データの精度がどのくらいか、誤差がどのくらい含まれているか
 - 自分の実験から物理公式はどこまで正しいと言えるか、
4. 実際の実験から、次のようなことも習得する。
 - ノギス、マイクロメータの使い方
 - 電流計、電圧計等の扱い方
 - オシロスコープの使い方

ii 実験題目およびテキスト

物理学実験 A のテーマとテキストを次にあげる。実験テーマは、年度により、変更や増減がある。(今回は実験 1 4, 1 5 は扱わない。)

番号	実験テーマ	テキスト
実験 1	オシロスコープ	手引書
実験 2	インピーダンス	手引書
実験 3	熱電対	手引書
実験 4	ボルダの振り子実験	手引書+教科書
実験 5	金属の電気抵抗	手引書
実験 6	液体の比熱	手引書
実験 7	レーザー光の回折	手引書
実験 8	ニュートンリング	手引書+教科書
実験 9	光の屈折	手引書
実験 10	半導体の抵抗	手引書
実験 11	半導体素子の実験	手引書
実験 12	フランクヘルツ	手引書
実験 13	光電効果	手引書
実験 14	地磁気の測定	手引書+教科書
実験 15	クントの実験	手引書+教科書

手引書:この小冊子

教科書:『物理学実験』

(吉田、武居、橘、武居著 三省堂)

表中のテキストの欄には、それぞれの実験で使用するテキストとして手引書、教科書、又は、その両方の使用を表わしている。ただし、手引書しか指示されていない場合も、教科書が参考になる場合が多いので、教科書も合わせて、参考にすることが望ましい。

iii 実験の実施方法

実験場所 理学部 1 号館 3 階の第 2 コラボレーション
実験室 (C302 号室) で行う

実験日時 平成 18 年度後期 月曜日 3,4 限目

スケジュール 10 月 2 日:(ガイダンス)

10月16日：(有効数字、誤差論を含め基礎事項について講義する)

10月23日：各グループごとに割り当てられたテーマの実験を開始

12月25日：第5回目のテーマ実験終了予定

1月15日：予備日

テーマの割り振り グループ分けとテーマの割り振りの最終決定は、10月16日(月) (第2回目授業日)の授業開始時まで学生実験室の入り口に掲示予定。二週間を1ユニットとして、一人の学生は全5テーマの実験を行う。ただし、実験8と実験9、および実験12と実験13、はそれぞれひとつの実験テーマとみなし同じユニットの中で実験を行う。

レポート提出期限 各ユニット終了ごと(2週間ごと)にレポートを書く。提出は各実験ユニット終了の翌週の出席確認時とする。初回実験テーマに対する実験レポート提出期限は11月6日。

成績評価 物理学実験Aの成績評価は、主として出席とレポートにより行う。出席状況とレポートの期限内提出に関する部分が評価の少ないウエートを占める。レポートの内容がいくら良くても出席状況が悪いために、合格点に届かないケースもときどき見られる。従って、単位取得のためには、

1. 欠席をしない。
2. 遅刻をしない(遅刻した場合は自己申告しないと、欠席扱いになります)。
3. レポートの提出期限を厳守する。

以上のことをまず守ること。ただし、期限内に提出すればどんなレポートでも良いというわけではない。最近の傾向として、提出された実験レポートに関して一部を除き、内容としては評価が困難なものが多い。中には単なる実験中に書かれたメモとしか思えないような記述体系がみられることもある。標準的、常識的なレポート作成の留意点等について以下に記すので参考にして下さい。

iv 服装、持ち物等

- (1) 服装は自由。白衣は不要。

- (2) 関数電卓を持参すること。

- (3) 1mm方眼紙を持参すること。

- (3) 実験用ノート(綴じてあるノート)とペンを用意すること。(実験中に生じるすべては記録ノートに消しゴムなどで消せないようにペンで記録する。)

v 実験室での事故防止等

- (1) 実験室内は禁煙である。
- (2) 実験室内はスリッパ履きである。雨がさは持ち込まないこと。
- (3) 高圧による感電に注意
- (4) ガラス器具の破損による怪我に注意。
- (5) 電気炉等で火傷をしないように。
- (6) 実験器材、装置を壊さないように注意すること。

vi レポート作成について

(初版 平成10年10月, 第2版 平成11年10月, 第3版 平成12年4月, 第4版 平成14年4月, 第5版 平成15年10月, 第6版 平成16年4月, 第7版 平成18年10月)

vi.1 レポートを書くための基本事項

レポートを読む人は誰かを考える

勿論教官が読む。そしてその内容を読んだ上で、理解度、物理的発想とそれから導かれる結果を正しく導き出しているかを判断する。

順序だてて判りやすく書く

何を目的に、何をを行い、その結果どのような結果が出てきて、それをどう解釈し、何が判ったかを読む人が理解出来るように書ければ適切な評価が得られる。また、自分自身で理解できているかどうかを作成したレポートで自己判断できる。

簡潔にまとめる

箇条書きにしたり、式や実験結果である図を正確に書くことにより、結局何をしたのかが容易に判る。

レポートは各自で書く

グラフはグラフ用紙に書く

グラフの書き方を習得するために、グラフはグラフ用紙に書くこと。Excelなどのソフトを使えばきれいなグラフを描けるが、解析しやすいグラフが描けるとは限らない。

vi.2 レポートに書くべきこと。書くべきでないこと。

表紙

レポートには配布した表紙を必ず付け、表紙には次のことを書くこと。

1. 実験題目
2. 実験者名および学籍番号
3. 共同実験者名
4. レポート提出期限
5. レポート提出期限
6. レポート提出日

レポートのサイズはA4とし、左上部をホッチキスでしっかりととめること。

実験の目的・方針

(備え付け) テキストの丸写しは避ける。自分の言葉で述べる努力をする。場合によっては、他の文献などを参考にする必要も生じる。(その際は教官等から示唆をもらえる。)

実験方法

実験方法の概要を説明する際に、(備え付け) テキストの丸写しは避ける。どんな装置を使用して、どんな条件で、何を測定したかを自分の言葉で簡潔に述べる。手順書ではない。(「つまみを回す」、「スイッチを入れる」といった記述は不要。)

実験結果

- 実験結果は、データの羅列ではなく、整理した上で書く。
- 実験によっては得られた数値に正負の符号がつき、それが重要な意味を持つことがあることを認識しておくこと。これを認識しておかないと結論が誤ったものになり、せっかく行った実験の意味を理解できないまま次の実験に進んでしまう。
- 表だけでは理解しづらいものも、グラフ化することによりはっきり理解できる場合が多い。グラフを描くときは軸を正確に描き、対応する物理量や単位をきちんとつける。また、何を示したグラフ・図であるかを明記しておく。
- さらにグラフを描く場合には、軸をいろいろ工夫することにより新しい発見につながることもある。例えば、もし $y = x^2$ の関係があったとしたら、 x 軸を x^2 に変換させれば両者は比例関係に見なせるので、グラフの上で直線が引ける。これを行わないと、「 x が大きくなるにしたがって、 y はどんどん大きくなっていく傾向がある」と考察して本質を見逃すことになる。
- 結果には事実のみを記せばよい。意見などを混同させると考察が誤った方向に向かってしまう恐れがある。

解析

解析結果を明示する。測定された実験結果それ自体が最終的に目標とする物理量になっている場合はよいが、多くの場合、実験結果を解析することにより、初めて必要な物理量が求まる。その経過を簡潔に記すこと。

考察

以下のような点を実験・解析結果をもとに考察する。

1. 実験・解析結果からどのような結論が導き出されるか。
2. 理論から計算された結果との比較。

3. 実験・解析結果の誤差・信頼性の評価、実験方法に改善するところがないかなど。
4. 実験・解析結果から何か新しい事実が導き出せないか。(目的以外の事柄に目を向けてみる。)
5. この結果からどのような理解が得られたか。また、課題としてはどのようなことが考えられるか。

考察がレポートの評価で最も大きなウェイトを占める。

「面白かった」などの感想は上記の事項をまとめた上で書くのなら問題はないが、感想と考察を混同してはならない。また、「マニュアルに間違いがある」などのコメントも見受けられることがまれにあるが、自分の理解が足りないためにそのように考えていないか、よく考えた上でレポートを書く前に教官等に尋ねること。その際、どこがどのようにおかしいのかをはっきりさせた上で質問すること。マニュアルに根本的な誤りがあるとは思えないが、スペルミスなどは新しく改訂した場合には若干あるかもしれない。そのような指摘は歓迎します。

vi.3 最後に

各自、記録用実験ノートは必ずつくること。生のデータはもちろん実験方法のまとめ、実験中の事柄、考察など何でもその場で(消せないペンで)記録しておく。あとで見てわかる程度にまとめておくと実験後のレポート作成に大いに役立つ。このノートがしっかり書いていないと、良いレポートは望めない。

レポートを仕上げる際に書いたものを自分で読み直して、自分自身で理解出来る内容かどうかを確認すること。本人に判らないものは読む人にとっても難解である。さらに実験結果から結論を導き出すには当然物理学的知識が必要になる。参考文献を積極的に活用し、自分なりに納得できるまで考えること。実験を通して、その手法・物理学的考え方を習得することが物理学実験の目標である。

vii 直接測定と間接測定

長さを物差しで測り、あるいは電圧を電圧計で読む場合のように、読み取った値そのものが求められてい

る観測値である場合は直接測定と呼ばれる。これに対して、電気抵抗を求める場合のように、試料に流れる電流と試料で発生する電圧を別々に測定し、その比をとることによってはじめて結果が得られるような場合は、間接測定とよばれる。測定値には必ず誤差が含まれており、ひとつひとつの直接測定値の測定精度が、それらから計算によって求められる間接測定値の有効桁数を決める。

viii 有効数字

有効数字とは

有効数字を端的に述べれば、「測定結果などを表わす数字のうちで、位取りを示すだけのゼロを除いた意味のある数字」、あるいは「最小桁に不確定な数字があるように表現した数値」である。従って、その数字をみれば、値そのものだけでなく、どのへんで誤差がでてくるのか、精度の限界はどこかが分かる。

例えば、最小目盛り 1mm の物差しを用いて、ある棒の長さを測定することを考える。最小目盛りの 1/10 を目測で読み、4.56cm という値を得ると、 $\pm 0.01\text{cm}$ 程度の誤差がありえることを示す。いいかえると、最後の桁の「6」は目測で決めたものであるが、「1」や「8」ではなく曖昧さがあるが「6」のほうが確からしいという意味で有効な(意味のある)数字である。しかし、その上の「5」は信頼できるというわけである。この測定値の 4.56 は「3」桁の有効数字として表現できる。この例のように、測定値の最後の桁には少なからず曖昧さが含まれる。また、測定値を記す際に、23.4g と 23.40g とでは誤差の程度は 1 桁違うので、最終桁の「0」は省略できない。

有効数字の表記

測定結果の数値は、あるけた数の有効数字で表わされる。有効数字には確実である数字及びプラス 1 けたのやや不確実性をもった数字とを含めるのが普通である。ゼロの場合、その数の一部であるときは意味のある数字として取扱うが、単に位取りを表わす場合はそうではない。例えば、誤差範囲が $\pm 0.0001\text{g}$ であることが分かっている 1.0234g の重量は 5 けたの有効数字をもっているが、同じ誤差範囲内にある 0.0234g の重

量は3けたの有効数字しかもたないことになる。また、 0.0234g の初めの2つのゼロはけた数を示すだけで有効数字ではない。これを μg 単位で表わすと $23400\mu\text{g}$ となるが、10のけたと1のけたのゼロが有効数字かどうか紛らわしい。

有効数字を明確に示す一つの方法は、数を科学的記数法(10のべき乗)で書くことである。この記数法によれば、10のべき乗の前の第1因子に含まれる数字はすべて有効である。上の数字の例をその形に書くと、 $234 \times 10^2\mu\text{g}$ あるいは $2.34 \times 10^4\mu\text{g}$ となる。 0.02340g の重量の場合は最後のゼロは有効数字であり、4けたの有効数字ということになる(これは科学的記数法によれば、 $2.340 \times 10^{-2}\text{g}$ と表わせる)。

直接測定値の有効数字

アナログ表示では最小目盛りの1/10までを有効数字とする。例えば、最小目盛1mmの物差しで長さを測るなら、0.1mmまで読みとる。

デジタル表示の測定器の場合、表示の最小桁まで測定感度があり、最小桁まで有効数字と見なせる。ただし、取扱説明書などで感度を確かめる必要がある。

viii.1 有効数字の計算

和算・引き算

足し算・引き算をした結果を、もとの有効数字のうち小数点以下の桁数が最も少ないものに合わせる。不確定な数字を下線で示す。

$$\begin{aligned} 1.42 \times 10^{-8} - 0.3 \times 10^{-8} &= 1.12 \times 10^{-8} \\ &= 1.1 \times 10^{-8} \quad (\text{I.1}) \end{aligned}$$

$$1.23 + 5.724 = 6.954 = 6.95 \quad (\text{I.2})$$

1.23は3桁の有効数字で、小数点以下2桁目が不確定なので、答えの4桁目は有効数字にならない。

$$4.25 - 4.20 = 0.05 = 5 \times 10^{-2} \quad (\text{I.3})$$

もともと3桁の有効数字同士の計算なのに、引き算によって1桁の有効数字になってしまった場合である。これを有効数字の桁落ちとよぶ。ただし、計算の途中で一時的にこのようなことが起きる場合には有効数字の桁

落ちは少ないこともある。例えば $(4.25 - 4.20) \times 23.5 = 1.18 = 1.2$ である。これは式を展開して計算することを考えてみれば分かる。

$$5.50 + 6.00 = 11.50 \quad (\text{I.4})$$

これは足し算によって有効数字の桁数が大きくなる場合である。

実際の計算では単位が入ってくるので、一層の注意が必要である。

$$\begin{aligned} 1.545[\text{g}] + 52[\text{mg}] &= 1.545[\text{g}] + 0.052[\text{g}] \\ &= 1.597[\text{g}] \quad (\text{I.5}) \end{aligned}$$

のように単位をそろえて、どの桁に不確かさがあるのか注意する必要がある。

掛け算・割り算

積・商(逆数の積なので同等)の計算で、異なる桁数の有効数字で計算する場合、結果の有効数字は、もとの有効数字のうち最も桁数の小さいものに合わせる。

$$4.23 \times 0.38 = 1.6 \quad (\text{I.6})$$

これは乗法を分解してみれば分かる。

$$\begin{aligned} 4.23 \times 0.38 &= 4.23 \times (0.3 + 0.08) \\ &= 1.269 + 0.3384 \\ &= 1.6074 = 1.6 \quad (\text{I.7}) \end{aligned}$$

有効数字が N 桁の数字の逆数は、やはり N 桁の有効数字になる。

定数、物理定数が入る計算

実際の計算では、データだけの演算ということではなく、定数や、精密な値が知られている物理定数などが入ることが普通である。これらの桁数は有効数字の判定には直接関係しない。

ただし、 π の値や、物理定数を使う場合には、計算する最大桁の有効数字よりも1桁以上大きな値を使って計算する。

$$4\pi r^2 = 4 \times 3.1416 \times (2.674)^2 = 8.985\text{m}^2 \quad (\text{I.8})$$

上の計算で、最初の 4 は 1 桁の有効数字というわけではない。π の値は距離 r の有効数字桁数より 1 桁大きくしてある。π は定数であるが、計算には途中の桁までしか使わないので、桁数の大きな有効数字のように取り扱っている。

その他

計算するとき、例えば平均値などをとると、計算上有効桁数よりも下の桁まで数字が出てくる。データとしてレポートなどに表示するときはあくまでも有効数字である。しかし、その平均値などを使ってさらに計算を進める過程では、計算の途中で有効桁数まで四捨五入したりせず、桁数の大きな数値のまま計算する。最後に出てきた答えに対して、初めて有効桁数に合わせて四捨五入する。

ix 誤差の取り扱い

ix.1 測定と誤差

誤差の定義と種類

ある量とその単位とを比較することを測定という。例えば、ものさしの目盛と長さを対応させたり、電圧計の針の指す目盛と電圧とを対応させる作業は量的な基準となる単位量を定め、その何倍に相当するかの数値を調べている。このようにして得られた値を測定値という。我々がどんなに正しく器械を使用し、注意深く測定しても、測定値は絶対に正しくなく、真の値(真値)を知ることはできない。測定値と真値との差を絶対誤差、或いは誤差という。

$$\text{誤差} = \text{測定値} - \text{真値}$$

誤差には発生原因によって次のように分類される

1. 系統誤差

- (a) 器械的誤差(測定器の不完全によるもの)
- (b) 個人的誤差(測定者の過失・未熟さによるもの)

- (c) 理論的誤差(使用する理論の省略などによるもの)

2. 偶然誤差

測定者がいかに熟練していても制御できない偶然に発生する誤差。(誤差論の対象となる。)

偶然誤差はその性質上、正負の誤差がほぼ同じ割合で出現するはずなので、測定回数を増やすことによりその影響を小さくすることができる。

最確値

真値が X で与えられる量の測定値が $X_1, X_2, \dots, X_n$ であるとき、測定値の平均値 $\bar{X}$ は

$$\bar{X} = X + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X) \quad (\text{I.9})$$

で与えられる。 $(X_i - X)$ は第 i 回目の測定における誤差であり、誤差が偶発的要因のみであれば測定回数 n を大きくすることにより $\sum (X_i - X)$ は限りなく小さくなり、平均値 $\bar{X}$ は真値 X に近づく。したがって、測定量を機器との直接比較により得る直接測定の場合、平均値を測定値の最確値とする。また、測定回数 n が多いほど平均値の信頼度が高まることがわかる。

測定の精度

測定の精度は誤差の絶対的な大きさだけでなく、測定量の大きさにも関係する。そこで、以下のような相対誤差という考え方を導入する。

$$\text{相対誤差} = \frac{\text{誤差}}{\text{真値あるいは最確値}}$$

1 km 程度の測定での 1 m の誤差と、10 cm 程度の測定での 0.1 mm の誤差とは同じ相対誤差である。いくつかの測定量の関数として結果が与えられる場合の相対誤差は次のように考えられる。結果 W が測定量 $X, Y, Z, \dots$ の関数として

$$W = X^p Y^q Z^r \dots$$

で与えられるとする。両辺の対数を取ると

$$\log W = p \log X + q \log Y + r \log Z + \dots \quad (\text{I.10})$$

となるので、 $X, Y, Z, \dots$ の測定誤差を $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \dots$ で表すと、結果の相対誤差に与える影響は式 (I.10) の両辺を微分して

$$\frac{dW}{W} = p \frac{dX}{X} + q \frac{dY}{Y} + r \frac{dZ}{Z} + \dots$$

$$\therefore \frac{\Delta W}{W} \sim \left| p \frac{\Delta X}{X} \right| + \left| q \frac{\Delta Y}{Y} \right| + \left| r \frac{\Delta Z}{Z} \right| + \dots \quad (\text{I.11})$$

の関係式で与えられる。すなわち、大きい指数を持つ量ほど及ぼす影響が大きいことがわかる。したがって、その量の測定精度を高める必要がある。

[例] 直径 D (~ 1 cm)、重さ W (~ 20 g) の球状物体の密度 ρ を、相対誤差 1/100 の精度で測定するためには、 D および W をどの程度の精度で測るのが無駄のない測定かを考えよ。

密度は D, W を用いて

$$\rho = W / \frac{1}{6} \pi D^3$$

となるので、両辺の対数を取り

$$\log \rho = \log W - \log \frac{\pi}{6} - 3 \log D$$

したがって、微小変化を考えると (π に誤差はないとする)

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} \sim \left| \frac{\Delta W}{W} \right| + \left| \frac{3 \Delta D}{D} \right|$$

よって、 D の精度は W の精度の 3 倍の影響を及ぼす。 ρ の相対誤差を 1/100 にするためには、右辺各項が同等の影響をもつよう、1/200 ずつにするのが合理的である。すなわち、

$$\frac{\Delta W}{W} \sim \frac{1}{200}, \quad \frac{3 \Delta D}{D} \sim \frac{1}{200}$$

$W \sim 20$ g, $D \sim 1$ cm であるから、

$$\Delta W \sim 0.1 \text{ g}, \quad \Delta D \sim \frac{1}{600} \sim 0.01 \text{ mm}$$

となり、重さ W は簡単な天秤でも十分であるが、直径の方はマイクロメータを必要とすることがわかる。

ix.2 誤差の評価

確率曲線

誤差が偶発的要因にのみよる場合、多数回の測定による誤差の分布はある一定の確率曲線に従うことが期

待される。確率論の教えるところによると、この曲線はガウス曲線と呼ばれ、

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi} e^{-x^2/2\xi^2} \quad (\text{I.12})$$

で与えられ、図 I.1 に示される。 ξ は後に示すが、曲線の広がりを与えるパラメータである。 $f(x)dx$ は $[x, x+dx]$ をとる確率で当然

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1$$

を満たす。この曲線は暗黙のうちに

1. 絶対値の等しい正負の誤差は等しく起こる。
2. 絶対値の小さい誤差の方が大きい誤差より多く起こる。
3. ある限界値より絶対値の大きい誤差は實際上起こらない。

という性質を具現している。この 3 つの特性を誤差の三公理という。

標準偏差

n 回の測定を行って得た測定値 $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$ の誤差の 2 乗平均値の平方根を測定値の標準偏差 (平均 2 乗誤差) といい

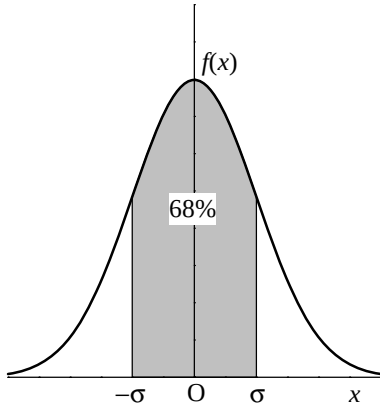
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

と書く。 n が十分に大きい場合には、和を積分に置き換え (ここで測定値を X' とおき、誤差を $x = X' - \bar{X}$ とおく。)

$$\sigma = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} f(X' - \bar{X})(X' - \bar{X})^2 dX'} \quad (\text{I.13})$$

$$= \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} f(x)x^2 dx} = \xi \quad (\text{I.14})$$

となる。すなわち、誤差の確率曲線の広がりを与えるパラメータには、標準偏差を取ればよいことがわかる。図 I.1 に示すように $x = \pm\sigma$ において曲線 $f(x)$ は変曲点となり、また区間 $[-\sigma, +\sigma]$ までの積分値はほぼ 0.68 となる。したがって、およそ 70% の確率で誤差

図 I.1: ガウス関数 $f(x)$ と標準偏差 σ の関係

の絶対値は σ より小さいことがわかるので、これを測定値の信頼度の目安として用いる。標準偏差の実際の計算においては、真値の代わりに最確値(平均値 $\bar{X}$)を用い、測定結果を

$$\bar{X} \pm \sigma$$

と表す。この際注意しなければならないのは、 σ はあくまでも測定値の信頼度を示す量であって、最確値の信頼度を与えるものではないという点である。

また、誤差の目安として σ ではなく、面積が $1/2$ となる点 r を用いて

$$\bar{X} \pm r$$

と表すことがある。この r は公算誤差(確率誤差)といい、標準偏差との間には

$$r = 0.6745\sigma$$

の関係がある。ガウス関数と公算誤差の関係を図 I.2 に示す。

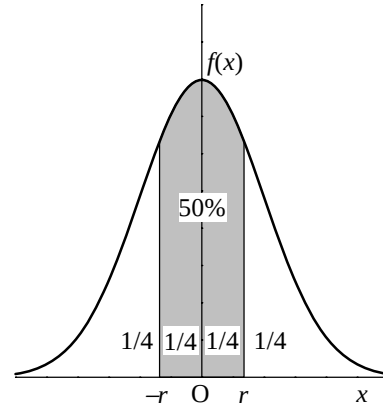
誤差、標準偏差と残差の関係

上で述べたように真値は求められないものであり、したがって測定値の誤差も不明である。そこで、実際には真値の代わりに最確値を用い、誤差の代わりに残差を考える。残差は次のように定義される。

$$\text{残差} = \text{測定値} - \text{最確値}$$

直接測定における最確値は平均値であるから、残差を Δ_i とすると

$$\Delta_i = X_i - \bar{X} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

図 I.2: ガウス関数 $f(x)$ と公算誤差 r の関係

ここで、 X_i は測定値、 $\bar{X}$ は平均値である。

誤差を $x_i (= X_i - X)$ とすると、次式のような誤差と残差の関係が得られることが証明される。

$$\frac{\sum x_i^2}{n} = \frac{\sum \Delta_i^2}{n-1} \quad (\text{I.15})$$

(証明) 真値を X 、誤差を x_i とすると、

$$\begin{aligned} x_i &= X_i - X = X_i - \bar{X} + (\bar{X} - X) \\ &= \Delta_i + (\bar{X} - X) \end{aligned} \quad (\text{I.16})$$

$\sum x_i^2$ を作ると、

$$\sum x_i^2 = \sum \Delta_i^2 + 2(\bar{X} - X) \sum \Delta_i + n(\bar{X} - X)^2 \quad (\text{I.17})$$

n が十分に大きいと、 $\sum \Delta_i = 0$

また、

$$\begin{aligned} (\bar{X} - X)^2 &= \left(\frac{\sum X_i}{n} - X \right)^2 \\ &= \frac{1}{n^2} \{ \sum (X_i - X) \}^2 = \frac{1}{n^2} (\sum x_i)^2 \\ &= \frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_1 x_2 + x_1 x_3 + \dots}{n^2} \\ &= \frac{1}{n^2} (\sum x_i^2 + \sum \sum_{i \neq j} x_i x_j) \end{aligned} \quad (\text{I.18})$$

n が十分大きいときは、同じぐらいの頻度で正、負の x_i 値が得られると考えられ、 $\sum \sum x_i x_j (i \neq j)$ は正、負相殺するので、

$$n(\bar{X} - X)^2 = \frac{1}{n} \sum x_i^2 \quad (\text{I.19})$$

式 (I.19) を式 (I.17) に代入すると、

$$\sum x_i^2 = \sum \Delta_i^2 + 0 + \frac{1}{n} \sum x_i^2$$

$$\sum x_i^2 \left(1 - \frac{1}{n}\right) = \sum \Delta_i^2$$

$$\therefore \frac{\sum x_i^2}{n} = \frac{\sum \Delta_i^2}{n-1} \quad (\text{証明終}) \quad (\text{I.20})$$

この式から標準偏差 σ は

$$\sigma^2 = \frac{\sum \Delta_i^2}{n-1}, \quad \therefore \sigma = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n-1}} \quad (\text{I.21})$$

この式を用いれば、残差を使って標準偏差 σ を求めることができる。

平均値の標準偏差

平均値 $\bar{X}$ の誤差について考える。真値を X とすると、その絶対値は次式で与えられる。

$$\sigma_a = \sqrt{(\bar{X} - X)^2} \quad (\text{I.22})$$

この σ_a と σ との間には式 (I.19) から次の関係がある。

$$\sigma_a = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{I.23})$$

式 (I.21) を式 (I.23) へ代入して、

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n(n-1)}} \quad (\text{I.24})$$

この σ_a は平均値の標準偏差と呼ぶ。標準偏差 σ は、個々の測定値の信頼度を表すものであるが、 σ_a は n 個の平均値 $\bar{X}$ の信頼度を表すものである。そして、測定結果を次のように表す。

$$\bar{X} \pm \sigma_a \quad (\text{I.25})$$

最確値は $\bar{X}$ で、真値は $\bar{X} + \sigma_a$ と $\bar{X} - \sigma_a$ の間にあることを示している。

(例) マイクロメーターによって、針金の直径を測定し、表 I.1 の結果を得た。細心の測定を行ったが、偶然誤差のため 1/1000 mm の桁がばらついている。その最確値 (平均値) $\bar{x}$ がどの程度信頼できるかについて σ_a を求めて目安とすることができる。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{15 \times 10^{-6}}{4}} \approx 2 \times 10^{-3}$$

表 I.1: マイクロメーターによる針金の直径の測定結果

測定 n	測定値 X_i [mm]	残差 Δ_i	Δ_i^2
1	1.224	0.001	1×10^{-6}
2	1.222	-0.001	1×10^{-6}
3	1.220	-0.003	9×10^{-6}
4	1.225	0.002	4×10^{-6}
5	1.223	0.000	0×10^{-6}
$\bar{X} = 1.222(8)$		$\sum \Delta_i^2 = 15 \times 10^{-6}$	

$\therefore$ 各測定値の信頼度は 0.002 [mm]

$$\begin{aligned} \sigma_a &= \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{15 \times 10^{-6}}{5 \times 4}} \\ &= 8.6 \times 10^{-4} \approx 9 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

$\therefore$ 針金の直径 $d = \bar{X} \pm \sigma_a = 1.2228 \pm 0.0009$ [mm]

平均値の公算誤差

誤差に関する確率論的な考察から

$$r_a = 0.6745 \sigma_a = 0.6745 \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n(n-1)}} \quad (\text{I.26})$$

という量を用い、この r_a を平均値の公算誤差と呼ぶ。そして、測定結果を次のように示す。

$$\bar{X} \pm r_a \quad (\text{I.27})$$

σ_a, r_a ともに平均値 $\bar{X}$ の信頼度を表す目安である。

誤差の伝播

測定精度の検討の際にわかったように、いくつかの測定量を用いて結果を求める場合には、誤差が単純な加算的にはならず、重みをかけた量の和で表された。標準偏差についても同様な考察が必要であるが、要点のみの述べるにとどめる。量 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_s$ を測定し関数関係

$$Z = F(X_1, X_2, X_3, \dots, X_s)$$

によって Z を求める場合の Z の標準偏差 σ は、 X_j の標準偏差 σ_j を用いて

$$\sigma = \sqrt{\sum_{j=1}^s \left(\frac{\partial F}{\partial X_j} \sigma_j \right)^2}$$

で与えられる。このように、誤差が伝わる状況を誤差伝播の法則と呼んでいる。

先の密度を求めた例について考えてみると

$$\rho = \frac{6W}{\pi D^3}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial W} = \frac{6}{\pi D^3}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial D} = -\frac{18}{\pi D^4}$$

であるから

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{6}{\pi D^3}\sigma_W\right)^2 + \left(\frac{18}{\pi D^4}\sigma_D\right)^2}$$

により、密度 ρ についての標準偏差が求められることになる。

実験1 オシロスコープ

感電に注意！

注意 1 これから行う実験では高電圧を使用するので感電に特に注意すること。誘導コイル上部にある放電針とそれを覆っているアクリル板、クルックス管とそれを支持しているスタンド、保護用のアクリル板には決して手を触れないこと。必ず決められた手順で実験を行い、不用意に電源の ON・OFF を行わないこと。スイッチを切った後も、コンデンサー等に電気がたまっていることがあるので、回路に素手で触らないこと。

注意 2 クルックス管はガラス製の真空管であり、壊れると危険であるので十分注意すること。指示された注意事項を守って実験を行えば、危険はありません。

1 目的

クルックス管を用いて、陰極線の性質を学ぶ。また、陰極線を利用して電圧の変化を視覚化する装置であるオシロスコープの使い方を修得する。

2 解説

2.1 陰極線

クルックス管

陰極線は電子のビームである。この実験ではクルックス管という真空管を用いて陰極線の性質を調べる。イギリスの化学者・物理学者のクルックスが、この放電管を用いて陰極線に関する先駆的な研究を行ったのでこの名がある。クルックス管の構造をその駆動回路と共に図 1.1 に示す。クルックス管内は高真空に保たれている。陰極 P と陽極 Q に高電圧が加えられると、P から Q に向かって陰極線が発生する。発生した陰極線は蛍光板に当たり緑色の輝線として観察される。

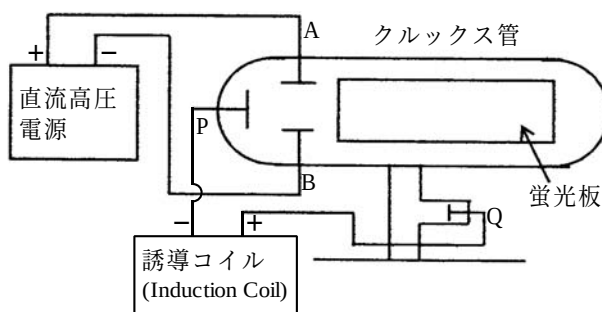


図 1.1: クルックス管の構造および駆動回路

偏向

図 1.1 の中で電極 A, B は偏向板で、ここに電圧を加えることにより、電場の効果で陰極線の軌道を変化させることができる。このことを電子ビームの偏向といい、電場による偏向を静電偏向という。この他に磁場による偏向があり、これを電磁偏向という。

電気回路

陰極線の性質を調べる実験の回路図を図 1.1 に示す。誘導コイルで高電圧を発生させ、クルックス管の陰極 P、陽極 Q に印加し陰極線が発生させる。直流高圧電源で発生させた直流電圧を偏向板 A, B に印加し、陰極線の軌道を変化させる。

2.2 オシロスコープ

オシロスコープは、陰極線の偏向を利用して、電圧を陰極線の軌跡の変化として視覚化する装置で、種々の物理実験において最も基本的な装置の一つである。

3 装置

3.1 陰極線の性質

クルックス管 (ケニス)、誘導コイル (New Power Induction Coil ケニス ID-6)、直流高圧電源 (ケニス)、U 字型磁石。

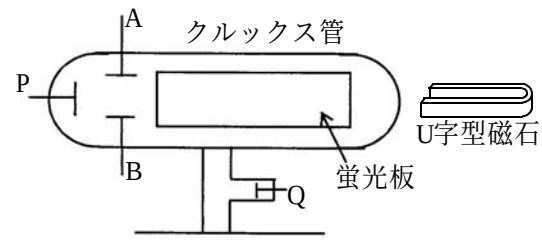


図 1.2: 磁石の近づけ方

3.2 オシロスコープの使い方

2 現象オシロスコープ (ケンウッド CS-4125)、発振器 (2 台、ケンウッド AG-203D)、移相器

4 実験

4.1 陰極線の性質

- (1) 図 1.1 を参考に配線を確認せよ。
 - (2) 誘導コイルの出力調整つまみが最低になっていることを確認せよ。誘導コイルの極性スイッチを動かしてはいけない。+ に設定されているはずである。
 - (3) 直流高圧電源の出力調整つまみが最低になっていることを確認せよ。
 - (4) 誘導コイルの電源スイッチを入れよ。クルックス管では陰極線が緑色の線状となって確認できるはずである。
- (注意) この際、誘導コイル上部の放電針間で、パチパチという音とともに放電が起こることがあるが、故障ではないので驚かないように。しかし、異常を感じたら、すぐに教官か TA に連絡し、自分では配線を触らないこと。
- (5) 直流高圧電源のスイッチを入れよ。出力調整つまみを徐々に上げ偏向板にかかる電圧を最大 (200V) にせよ。輝線がどちらの方向にどれだけ移動したかを記録し、輝線の移動した距離から偏向感度を求めよ。偏向感度は、

偏向感度 = 移動した距離 / 印加された電圧 (1.1)

の式で表わされる。得られた値に単位をつけること。

- (6) 偏向板の上側が + で、下側が - である。このことから電子の電荷の正負を調べよ。
- (7) 直流高圧電源の出力調整つまみを最少にした後、電源を OFF にせよ。
- (8) クルックス管の右側から図 1.2 のように U 字型磁石を輝線に水平にして近づけ、輝線の移動の様子を観察せよ。このことから、磁石の N/S と電子ビームの曲がり方との関係を調べよ。
- (9) 上の実験 (8) の結果が、ローレンツ力に一致することを確認せよ。
- (10) 誘導コイルの電源を OFF にせよ。

4.2 オシロスコープ

時間変化する電圧信号のモニター

オシロスコープには色々な使い方があるが、まず、時間的に変化する電圧信号をモニターしてみよう。

- (1) 図 1.3 のオシロスコープの前面パネルの説明、図 1.4 の発振器の前面パネルの説明を参考にし、オシロスコープのチャンネル 1⑬(【CH1】) に発振器の信号を入力するように配線せよ。オシロスコープへの接続は BNC コネクタと呼ばれるコネクタによって行う。これは、物理実験で非常によく使われるものである。オシロスコープのチャンネル 1(【CH1】) の接続端子の突起部に、コード側のコネクタの切り込みを合わせて差し込み、時計回りに 90 度回転させることにより装着する。コネクタを外すときには、反時計回りにコネクタを 90 度回転させればよい。また、発振器への接続はバナナプラグを用いて行う。発振

器の2つの OUTPUT (出力端子)⑧のうちアース側(黒色)を黒色のバナナプラグに接続し、もう一方(白色)を赤色のバナナプラグに接続せよ。

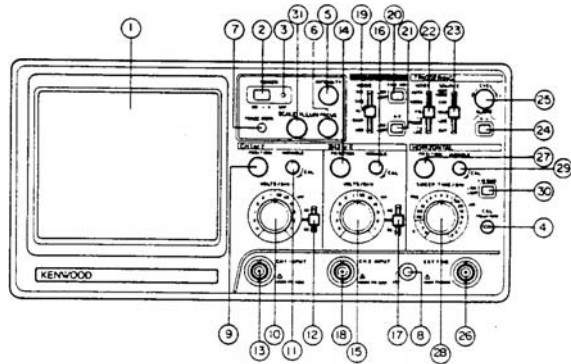


図 1.3: オシロスコープの前面パネル

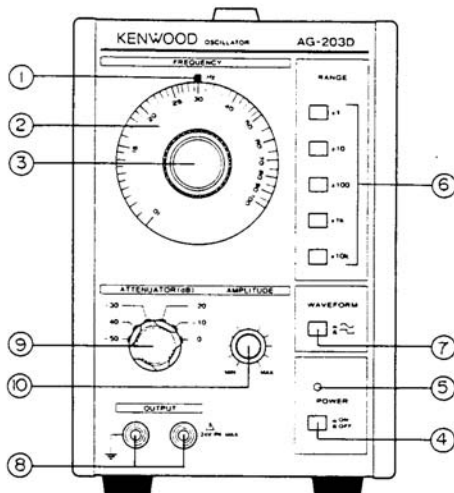


図 1.4: 発振器の前面パネル

- (2) オシロスコープの電源②を入れよ。VERTICAL MODE⑨を【CH1】にして、縦軸の信号をチャンネル 1 に選ぶ。TRIGGERING MODE⑫を【AUTO】にせよ。TRIGGERING SOURCE⑬を【CH1】にして、トリガーの信号源をチャンネル 1 に選ぶ。また、スイッチ⑭を【AC】にして入力信号の直流成分をカットして交流成分のみを見ることにする。
- (3) 信号発生器の ATTENUATOR⑨が -20、AMPLITUDE⑩が MIN であることを確認した後、電源④を入れよ。

- (4) 発振器の RANGE⑥の $\times 10$ のボタンを押し、FREQUENCY③を回して 10 にセットせよ。これで、発振器の周波数は $10 \times 10 = 100 \text{ Hz}$ になったはずである。さらに、WAVEFORM⑦のボタンを押して、正弦波を選択せよ。

- (5) オシロスコープの【VOLT/DIV】つまみ⑩を回して 1 V を選べ。この 1 VOLTS/DIV は、オシロスコープの画面上縦軸の 1 マスが 1 V であることを意味する。また、【TIME/DIV】つまみ⑫を回して 5 ms を選べ。この 5 ms/DIV は、オシロスコープの画面上横軸の 1 マスが 5 ms であることを意味する。発振器の AMPLITUDE⑩を徐々に回していくと、オシロスコープの画面上には、横軸を時間、縦軸を電圧として、発振器で発生させた正弦波の信号が現れるはずである。オシロスコープの画面から、信号の最大電圧と最小電圧、周期を読みとれ。また、入力した信号の周波数と周期の関係を調べよ。その際、電圧と周期をなるべく正確に読み取れるように適宜【VOLT/DIV】つまみ⑩と【TIME/DIV】つまみ⑫を調節せよ。

注 この際、VARIABLE つまみ⑪,⑬,⑭が時計回り方向に回り切っていることを確認せよ。回り切っていないと (5) で合わせた【VOLT/DIV】や【TIME/DIV】のレンジ値が正しくなくなる。

2 現象オシロスコープを用いた位相差の測定

1 つ前の実験では 1 つの電圧信号だけをモニターしたが、今度は、2 つの信号を同時にモニターしてみよう。

- (1) 発振器からの信号を T 字型の BNC コネクタを使用して 2 つに分割し、一方をオシロスコープのチャンネル 1 に、他方を移相器 (電圧信号の位相を変化させる装置) の INPUT に入力せよ。さらに、移相器の OUTPUT をオシロスコープのチャンネル 2⑬に接続せよ。接続には両端に BNC コネクタのついたケーブルを使用する。
- (2) 移相器の電源を入れよ。
- (3) VERTICAL MODE⑨を【CH1】にすると、チャンネル 1 に入力された電圧信号の時間変化を観察

できる。チャンネル 1 の【VOLT/DIV】つまみ⑩を 1 V にせよ。

- (4) VERTICAL MODE⑨を【CH2】にすると、チャンネル 2 に入力された電圧信号の時間変化を観察できる。チャンネル 2 の【VOLT/DIV】つまみ⑮を 1 V にせよ。
- (5) VERTICAL MODE⑨を【CHOP】にすると、チャンネル 1 と 2 に入力された電圧信号の時間変化を同時に観察できる。移相器の調節つまみと反転スイッチを操作して見よ。チャンネル 2 の電圧信号の位相が変化するのを観察できるはずである。位相差が 0 度、45 度、90 度、180 度のときのチャンネル 1 と 2 の信号の様子をスケッチせよ。チャンネル 1 と 2 の信号が重なって見にくいときは、POSITION⑨、⑭を適宜調節せよ。

オシロスコープによるリサージュ図形の観察 1

1 つ前の実験では、チャンネル 1 と 2 に入力された信号を横軸を時間として観察した。今度は、チャンネル 1 に入力された信号を縦軸、チャンネル 2 に入力された信号を横軸として観察してみよう。この際現れる図形をリサージュ図形という。

- (1) 4.2 の実験の状態で【X-Y】スイッチ②を押し込め。リサージュ図形が観察できる。振幅の調整はチャンネル 1 と 2 の【VOLT/DIV】つまみ⑩、⑮でできる。画面の中央に移動したい時は、チャンネル 1 の【POSITION】つまみ⑨と HORIZONTAL の【POSITION】つまみ⑳で調整できる。
- (2) 【X-Y】スイッチ②を再度押せば、再び横軸が時間軸になり、正弦波が観察できる。モードを切り替えながら、チャンネル 1 と 2 の信号の位相差が 0 度、45 度、90 度、180 度のときのリサージュ図形をスケッチせよ。移相器の調節つまみと反転スイッチを利用して位相差の調整ができる。

オシロスコープによるリサージュ図形の観察 2

1 つ前の実験では、チャンネル 1 と 2 に入力される電圧信号の周波数が同じ場合のリサージュ図形を観察

したが、チャンネル 1 と 2 に入力される信号の周波数を変えると、種々のリサージュ図形が観察される。

- (1) 移相器の電源を切って取り外し、2 つの発振器の信号をそれぞれオシロスコープのチャンネル 1 と 2 に入力するように接続せよ。接続には一端にバナナプラグのついたケーブルを使用せよ。2 つの信号発生器の ATTENUATOR⑧が -20、AMPLITUDE⑩が MIN であることを確認した後、電源④を入れよ。チャンネル 1 と 2 の【VOLT/DIV】つまみ⑩、⑮は、どちらも 1 V に設定し、【TIME/DIV】つまみ㉔を回して 5 ms を選べ。VERTICAL MODE⑨を【CHOP】、【X-Y】スイッチ②を OFF、TRIGGERING SOURCE③を【CH1】にせよ。2 つの発振器の RANGE⑥の $\times 10$ のボタンを押し、FREQUENCY③を回して 10 にセットせよ。これで、発振器の周波数は $10 \times 10 = 100 \text{ Hz}$ になったはずである。さらに、WAVEFORM⑦のボタンを押して、正弦波を選択せよ。チャンネル 1 に入力している発振器の AMPLITUDE⑩を徐々に回し、オシロスコープの画面上に正弦波が現れるようにする。次に、もう一方の発振器の AMPLITUDE⑩を徐々に回し、2 つの正弦波の振幅が一致するようにする。この際、発振器の周波数を丹念に調整すれば、チャンネル 2 の信号は静止しないまでも、ゆっくりと動くようになる。
- (2) 以上の準備ができれば、チャンネル 1 と 2 に接続された発振器の周波数が (100 Hz, 200 Hz) (100 Hz, 300 Hz) (200 Hz, 300 Hz) (200 Hz, 500 Hz) (300 Hz, 400 Hz) (300 Hz, 500 Hz) 等に設定し、【X-Y】スイッチ②を ON にして各リサージュ図形を描け。リサージュ図形は完全には静止しないが発振器の周波数調整を丹念に行ってなるべく静止するように努力せよ。変化してゆく図形のうち、特徴的なものをスケッチし、リサージュ図形のできる理由を考えよ。
- (3) 【X-Y】スイッチ②を OFF にして、オシロスコープの電源を OFF にせよ。2 つの発振器の AMPLITUDE⑩を MIN した後、電源を OFF にせよ。

実験2 インピーダンス

1 目的

オイルコンデンサー、電解コンデンサー、チョークコイルのインピーダンスを求め、そのキャパシタンス C 、インダクタンス L 、内部抵抗 r を計算する。

2 理論

コンデンサーやコイルは交流に対して抵抗として働く。図 2.1(a) のようにコンデンサー両端の電圧とこれに流れる電流をそれぞれ

$$v = v(t) = \text{real } V, \quad i = i(t) = \text{real } I \quad (2.1)$$

とする。ただし $\text{real } V$ と $\text{real } I$ は複素数 V, I の実数部分とする。ここで虚数単位 $j = \sqrt{-1}$ を用いて、

$$V = V_0 \exp j\omega t, \quad I = I_0 \exp j\omega t \quad (2.2)$$

すると、 V と I との間に次の

$$V = IZ_C \quad (2.3)$$

の関係がある。ここで Z_C は

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (2.4)$$

で表わされ、コンデンサー C の複素インピーダンスという。実際の電流 $i(t)$ 、電圧 $v(t)$ にもどすと、 I_0 を実数として、

$$i(t) = I_0 \cos \omega t \quad (2.5)$$

$$v(t) = \text{real}(IZ_C) = -\left(\frac{I_0}{\omega C}\right) \sin \omega t \quad (2.6)$$

となる。複素インピーダンスの虚数部分 $-1/\omega C$ をコンデンサー C のリアクタンスという。図 2.1(b) のようなインダクタンス L をもつコイルの場合にも、同様に

$$V = IZ_L \quad (2.7)$$

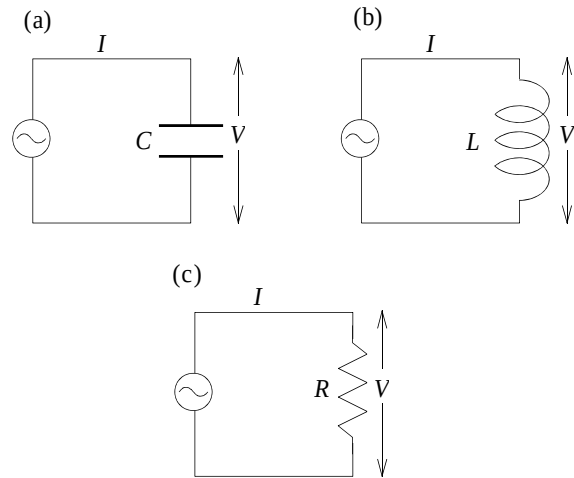


図 2.1: 交流回路にコンデンサー (a)、コイル (b)、抵抗 (c) をつないだ回路図

の関係がある。ここで Z_L は

$$Z_L = j\omega L \quad (2.8)$$

で表わされ、コイル L の複素インピーダンスという。複素インピーダンスの虚数部分 ωL をコイル L のリアクタンスという。普通の抵抗 R についても同様に表現すれば (図 2.1(c))、抵抗 R の複素インピーダンスは単純に

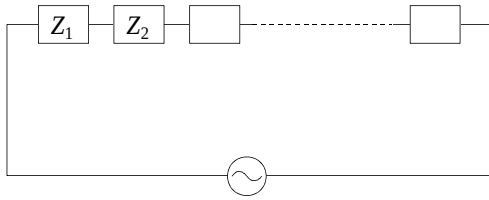
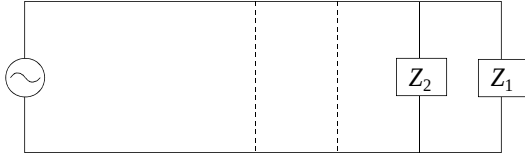
$$Z_R = R \quad (2.9)$$

となる。一般に、複素インピーダンスを用いると、抵抗、コイル、コンデンサーを図 2.2、図 2.3 のように直列または並列に連結した回路の複素インピーダンス $|Z|$ は

$$\text{直列} : Z = Z_1 + Z_2 + \dots \quad (2.10)$$

$$\text{並列} : 1/Z = 1/Z_1 + 1/Z_2 + \dots \quad (2.11)$$

となる。複素インピーダンス Z の絶対値 $|Z|$ を単にインピーダンスという。複素インピーダンス Z の絶対値 $|Z|$ とその位相 δ を用いて $Z = |Z| \exp j\delta$ と表わ

図 2.2: インピーダンス Z を直列につないだ回路図図 2.3: インピーダンス Z を並列につないだ回路図

すと、電流 I と電圧 V の関係は $V = I|Z| \exp j\delta$ となる。したがって、 I_0 を実数とし、 $I = I_0 \exp j\omega t$ とすると

$$i(t) = I_0 \cos \omega t \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} v(t) &= \text{real}(I_0 |Z| \exp j(\omega t + \delta)) \\ &= I_0 |Z| \cos(\omega t + \delta) \end{aligned} \quad (2.13)$$

となり、 δ は $i(t)$ と $v(t)$ との位相のずれを表わし、 $|Z|$ は、 $i(t)$ と $v(t)$ をともに実効値で測った時の抵抗を表わしていることがわかる。

3 装置

スライダック (オートトランスフォーマ)、デジタルマルチメーター、抵抗、オイルコンデンサー、電解コンデンサー、チョークコイル、リード線数本。

4 実験

4.1 実験 I オイルコンデンサー

- (1) スライダックのダイヤルが 0 V になっていることを確かめよ。
- (2) スライダックの 1 次側に 100 V をつなぐ前に、図 2.4 に示すような、結線を行う。その後、スライダックの 1 次側に 100 V をつなぐ。

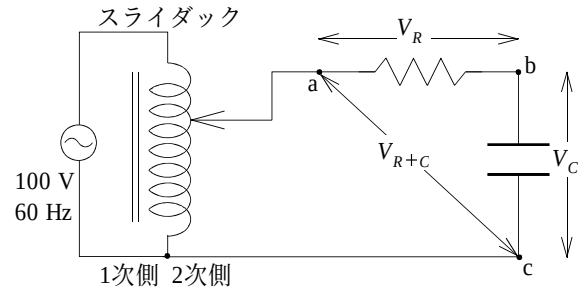


図 2.4: 測定装置の配線図

- (3) スライダックの出力電圧を 0 から徐々に上げてゆき、ab 間の電圧 (実効値、以下同じ) V_R 、bc 間の電圧 V_C 、ac 間の電圧 V_{R+C} をデジタルマルチメーターをもちいて測定せよ (V_R 、 V_C 、 V_{R+C} を測定している間はスライダックの設定は変えない)。スライダックの出力電圧は、30 V 以下にすること。また、データは 5 V おきに測定せよ。測定が終わったら、スライダックの出力電圧を 0 V にしておくこと。なお、スライダックの目盛は目安にしかすぎないので注意すること。
- (4) $V_R = IR$ (R の値は実験装置に記されている)、(変更することがあるので、表示に注意すること) の関係から、この回路の流れる電流を計算せよ。
- (5) V_C vs I および V_{R+C} vs I のグラフを描け。
- (6) グラフの傾きから、コンデンサーのインピーダンス $|Z_C|$ と、抵抗とコンデンサーの連結したインピーダンス $|Z_{R+C}|$ を計算せよ。
- (7) $|Z_C| = \frac{1}{\omega C}$ として、コンデンサーのキャパシタンス C を求めよ。
- (8) $|Z_{R+C}|^2 = R^2 + |Z_C|^2$ という関係が成り立っているかどうか調べよ。

4.2 実験 II 電解コンデンサー

- (1) 電解コンデンサーをオイルコンデンサーのかわりに実験 I と同様の実験を行え。
- (2) 実験 I と同様に $|Z_C| = \frac{1}{\omega C}$ から、 C を計算せよ。

- (3) 電解コンデンサーの場合、内部抵抗 r が比較的大きいので、

$$|Z_{R+C}|^2 > |Z_C|^2 + R^2$$

となっているはずである。これを確かめよ。

- (4) 内部抵抗 r を考慮に入れると、 Z_C と Z_{R+C} は、

$$Z_C = r + \frac{1}{j\omega C} \quad (2.14)$$

$$Z_{R+C} = R + r + \frac{1}{j\omega C} \quad (2.15)$$

のように表わせる。この式より、電解コンデンサーの C と r は、

$$r = \frac{1}{2R}(|Z_{R+C}|^2 - |Z_C|^2 - R^2) \quad (2.16)$$

$$\frac{1}{(\omega C)^2} = |Z_C|^2 - r^2 \quad (2.17)$$

で与えられる。 C と r の値を求めよ。

4.3 実験 III チョークコイル

- (1) コンデンサーの代わりに、チョークコイルをつないで、同様の実験を行え。
- (2) はじめは、チョークコイルの内部抵抗 r を無視して $|Z_L| = \omega L$ からインダクタンス L を計算せよ。
- (3) 次に、 r を考慮に入れ、チョークコイルの複素インピーダンス Z_L と、 R と連結した時の複素インピーダンス Z_{R+L} は、

$$Z_L = r + j\omega L \quad (2.18)$$

$$Z_{R+L} = R + r + j\omega L \quad (2.19)$$

で与えられる。これから、 L と r は

$$r = \frac{1}{2R}(|Z_{R+L}|^2 - |Z_L|^2 - R^2) \quad (2.20)$$

$$(\omega L)^2 = |Z_L|^2 - r^2 \quad (2.21)$$

より与えられる。 L と r の値を求めよ。

注意

- (1) コンデンサーやコイルをつけ替える時は、必ず、スライダックを 0 V に戻してからすること。
- (2) 富山市の家庭用交流は、 $f = 60 \text{ Hz}$ である。また、 $\omega = 2\pi f$ である。
- (3) スライダックは最大 30 V 程度にしておくこと。流れる電流値の最大を 100 mA 程度にするためである。測定にもちいるコンデンサー等のインピーダンスが変われば、スライダックの最大電圧も変えなければならない。

5 課題

- (1) コンデンサーの複素インピーダンスが $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$ で求められることを示せ。(ヒント: $Q(t) = C v(t)$, $i(t) = \frac{dQ(t)}{dt}$ より、 $i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$)
- (2) コイルの複素インピーダンスが $Z_L = j\omega L$ で与えられることを示せ。(ヒント: $v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$)
- (3) 式 (2.16), (2.17) を確かめよ。(ヒント: 式 (2.14), (2.15) を複素平面上に図示すると図 2.5 のようになる。或いは、 $|Z|^2 = Z \cdot Z^*$ (Z^* は Z の共役複素数) の関係を用いる。)
- (4) 式 (2.20), (2.21) を確かめよ。(ヒント: (3) と同様)

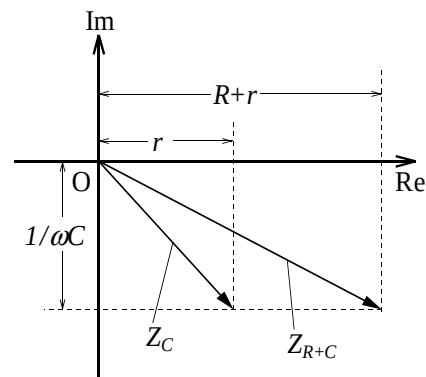


図 2.5: 複素平面における Z_C と Z_{R+C} の関係

実験3 熱電対

1 目的

スズ (Sn) の融点 (凝固点) および水の沸点を利用して、アルメル-クロメル熱電対の温度-熱起電力の校正グラフを作成する。あわせて、スズの凝固点を通過する際の冷却の様子 (時間変化) を観察する。

2 理論

2.1 熱電対

熱起電力 2種類の金属 A, B および電圧計を図 3.1 の様に結線し、金属 A と B の接合点 a と b の間に温度差をつけるとその温度差の大きさに応じて電圧計に数ミリボルト (mV) 程度の大きさの起電力 (電位差) が生じる。この現象をゼーベック効果といい、この起電力を熱起電力 (thermo-electric voltage) という。またこの2種類の金属の対を熱電対と呼ぶ。熱電対には様々な2種類の金属の組み合わせのものがあ、生じる熱起電力の大きさも様々である。

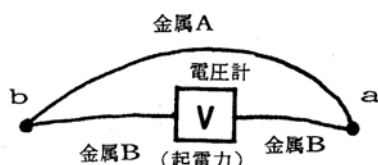


図 3.1: 金属 A, B をつないだときの熱起電力

熱起電力の原因 熱起電力の生じる原因は簡単に言うと次の様に説明される。点 a が点 b に比べて温度が高いとすると両者の温度差をなくそうとして熱の流れが生じる。熱の流れは金属内の電子が暖かい点 a 側から冷たい点 b 側へ動くことによって生じるがこの電子は電荷をもっているので、電荷が動くと電場が発生するので起電力が生じる。強制的に温度差をつけたままにすると、この起電力はそのまま保持される。これが

熱起電力の原因である。温度差が大きければ大きいほど、温度差をなくそうと動く電子の数は多くなるので熱起電力は大きくなると予想できる。またこの熱起電力を利用してエネルギーを蓄積する試みが最近行われている。

熱電対 熱電対は温度差が起電力と 1 対 1 の関係にあるため、温度計として利用することができる。例えばある熱電対に対して点 b をある一定の温度 (例えば 0 °C や室温など) に保ったとき、点 a のそれぞれの温度に対する熱起電力が分かっているれば、逆に熱起電力を測定することにより点 a の点 b に対する温度差が分かるわけで、点 b が 0 °C ならば熱起電力は点 a の温度そのものに対応することになる。

アルメル-クロメル熱電対 温度計として要求される性質は感度が優れていること、すなわち点 a のわずかな温度の変化に対して十分な熱起電力の変化があることである。つまり点 a が 100 °C から 101 °C まで変化したときに生じる熱起電力の変化が電圧計で読み取れないほど小さいと測定しても、実際に温度変化をしているのに温度計にはそれが現われてこないということになってしまい、意味が無い。本実験で用いる熱電対温度計はアルメル-クロメル熱電対である。アルメル (almel) はニッケル 94%, アルミニウム 3%, その他少量のマンガン、鉄、シリコンを含む合金である。クロメル (chromel) はニッケル 90%, クロム 10%, その他少量のマンガン、鉄、シリコンを含む合金である。この熱電対は -150 °C から 900 °C の温度範囲で感度としての熱起電力が十分大きいので温度計として利用することができる。-150 °C より低温では感度が非常に悪くなり、一方 900 °C を越える高い温度では熱電対自身が変形・変質してしまう。

測定回路 熱電対を実際に温度計として利用する場合は図 3.1 とは配置が多少異なるが等価な、図 3.2 のよ

うな回路を組むのが普通である。点bは長時間一定の温度を保つことができる水の凝固点 (0℃) や室温 (室温に保持された水など：15℃前後) を利用する。

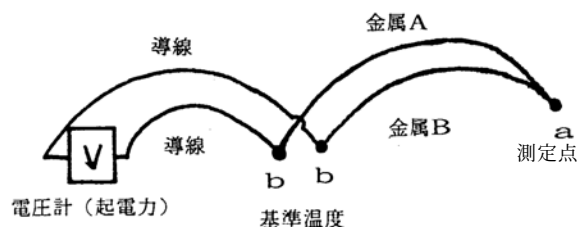


図 3.2: 熱電対の配線図

2.2 金属の融解と凝固

冷却曲線 金属を熱して融解させた後、静かに自然冷却すると、時間の経過とともに温度はゆっくりと低下する。温度が凝固点にまで達すると温度降下は止まり、しばらく一定の温度にとどまる。その後再び温度降下が始まる。融解した金属の中に熱電対を挿入し、熱起電力を時間の経過とともに測定すると、図 3.3 の様なグラフを得ることができる。このグラフを冷却曲線という。

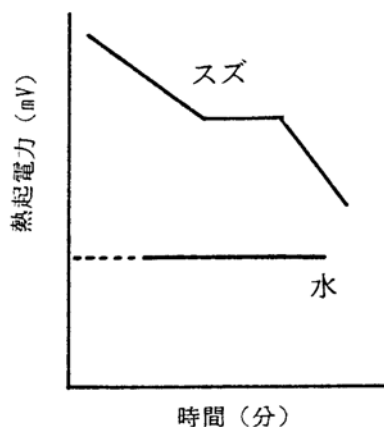


図 3.3: 水とスズの冷却曲線

熱電対の校正 中に含まれる金属成分に関して公称値を持つ熱電対の熱起電力とそれから導き出される温度の間の数値的関係は標準温度計換算表として公表されている。アルメル-クロメル熱電対の場合、換算表は「理科年表」(国立天文台編・丸善)等に記載されてい

る。しかしながら、実際に用いるアルメルやクロメルは、2.1 で述べたような標準の成分組成とはわずかに異なることがあり、それに伴い標準換算表からの若干のズレが生じるのが普通である。従って一般には様々な物質の既知の融点や沸点を利用して標準換算表からのズレを修正する。このような修正作業を校正という。

3 装置

アルメル-クロメル熱電対、マントルヒーター (電気炉) および上蓋、基準温度用デュワーびん、アルコール温度計、デジタルマルチメーター (電圧計)、スズの入ったガラス管、水用試験管と熱電対保護用ガラス管

(注1) アルメル-クロメル熱電対は切れやすいので取り扱いには十分注意すること。

(注2) デジタルマルチメーターの操作法は備え付け別紙を参照のこと。

(注3) スズは1/5気圧のアルゴンガスとともに石英ガラスに密封されている。

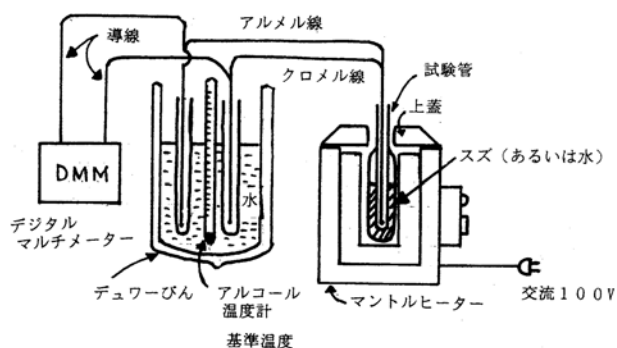


図 3.4: 装置の概略図

4 実験

4.1 スズの冷却曲線の作成

(1) 装置を図 3.4 に示すように組み立てる。この際、熱電対はスズの入ったガラス管の中央の空間部分の底部に当るまでしっかりと挿入する。デジタルマルチメーターの「POWER」スイッチを押してONの状態にする。「DCmVΩ」の部分が点灯し、FUNCTIONが

「DCV」になっていること、および表示される起電力が 0.03mV 程度以下になっていることを確認する。

(2) マントルヒーターの出力調整つまみを「OFF」にしてから交流 100V のコンセントに差し込む。

(3) マントルヒーターの出力調整つまみを押しながら反時計回りに回すことにより出力を「HI」にして温度を上昇させる。始めはデジタルマルチメーターの数値は変わらないが 2～3 分待つことにより数値が大きくなっていく。数値が大きくなっていくことは熱起電力が大きくなっていくことを示しており、温度が上昇していくことを意味する。

デジタルマルチメーターの数値（すなわち熱起電力）が 4 ミリボルトを越えたら出力調整つまみを「5」に下げる。6 ミリボルトを越えたら出力調整つまみを「OFF」にする。

(4) 余熱により温度はデジタルマルチメーターの値で 10 ミリボルト程度まで上がる。8 ミリボルトを越えたらその時刻を $t = 0$ (分) として起電力の記録を始める。9 ミリボルトを越えたらマントルヒーターの上蓋をとる。

(注 1) デジタルマルチメーターの数値は刻々と変わっていくので、読み取るときは操作パネルの「HOLD」ボタンを 1 回押すと押したときの数値を表示してくれる。読み取った後、もう一度このボタンを押すと再び数値は変わるようになる。

(注 2) もし起電力が 9 ミリボルトを越えた後、9.5 ミリボルトまで上がらなかったら、マントルヒーターの出力調整つまみを「LO」にして様子をみよ。明らかに上がる傾向が認められたら直ちに「OFF」にせよ。(いつまでもそのままにしておくと、温度が上がり続けてしまい、実験に要する時間が極端に長くなる恐れがある。)

起電力は初め 1 分毎に測定し、横軸時間 (分)、縦軸熱起電力 (ミリボルト:mV) としてすぐにグラフ用紙に記入する。

(5) 冷却が始まったら熱起電力を 30 秒毎に測定し、同じグラフ用紙に記入する。

また温度基準用のデュワーびん内の温度をアルコール温度計で測定する。この温度は基準温度なので、びんを動かしたり蓋を開けたりしてはいけない。その後実験中に基準温度が変化していないことを時々確認する。

(6) 9 ミリボルト弱の数値で留まった後、再び熱起電力が下がり始めたら 7.5 ミリボルト程度に下がるまで 30 秒毎に起電力を測定し、図 3.5 のような特性が得られたら終了する。ただし、図 3.5 の場合と基準温度 (室温) が異なることが有り得るので、数値は若干異なる。スズの凝固点における熱起電力値は、記録した起電力が一定となっている部分と合うようにグラフの上に横軸に平行に直線を引き読み取り、かつデータを平均して求める。両者の差異を確認する。熱電対を引き抜いた後スズの入ったガラス管の先端上部を持ち断熱材を敷いた箱に置く。

(注) このときガラス管の下の方を持つと火傷する恐れがあるので気をつけること。

(7) 試料を水に換えて水の沸点における熱起電力を測定する。水用試験管に半分程度水を入れ、熱電対を細いガラス管で保護してから、水の入った試験管に挿入した後、マントルヒーター内にこれをセットする。上蓋はかぶせなくてもよい。

(8) マントルヒーターの出力調整つまみを「HI」にしてスズの場合と同様に温度が上昇するのを待つ。熱起電力が 2 ミリボルトを越えたらスズの場合と同様に 1 分毎に熱起電力を記録する。沸騰が始まり、熱起電力が一定になったらその値を 30 秒毎に 10 回記録する。これを平均して水の沸点での熱起電力値とする。これが終わったら出力調整つまみを「OFF」にしてコンセントを抜く。デジタルマルチメーターは「POWER」スイッチを押して OFF にして同じくコンセントを抜く。水 (湯) はやや冷えるまで待ってから流しに捨てる。

4.2 熱起電力と温度の関係を表わすグラフの作成

前節でスズの融点 (凝固点) と水の沸点における熱起電力が求められた。各々の熱起電力を縦軸に温度を横

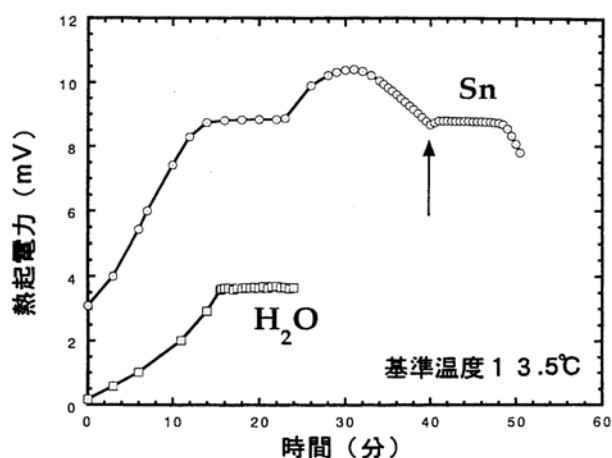


図 3.5: 冷却曲線の測定例

軸にしてグラフ用紙に結果を記す(プロットする, という)。さらに, 基準温度では熱起電力は零であるので, 温度軸上に基準温度をプロットせよ。(図 3.6 参照)3つの点をなめらかに結ぶ。おおよそ図 3.6 のような結果が得られるはずである。(縦軸の起電力は意図的に数値を記していないので, 各自きちんと目盛に数値を記すこと)

なお, スズの融点は 231.97°C , 水の沸点は 100.00°C (ともに 1 気圧下) である。

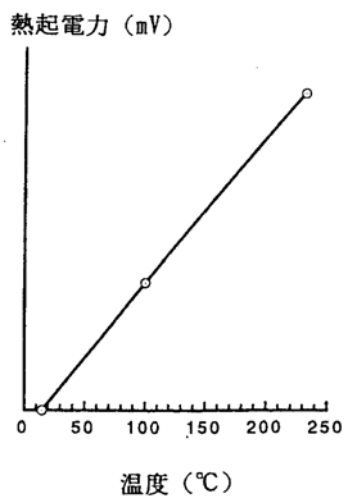


図 3.6: 熱起電力と温度の関係のグラフ

4.3 自分の指先の温度の測定

アルメル-クロメル熱電対の熱起電力と温度の関係が得られたので, このグラフを利用して自分の指先の温度を測定せよ。

(注) 熱電対は切れやすいので, 移動させたり無理に引っばったりしないこと。

5 問題

(これは実験終了後各自で行う)

1. 熱電対による温度測定の利点を自分の考える限り列記せよ。
2. アルメル-クロメル熱電対以外の熱電対にはどのようなものがあるかを調べ, 構成金属, 測定可能温度範囲をまとめよ。
3. 今回は高温での実験を行ったが, 絶対零度 (-273.15°C) 付近でも種類により熱電対は良い温度計として利用できる。温度校正のための基準温度として極低温ではヘリウムの沸点, 窒素の沸点, 水素の沸点などを利用する。各々の沸点を参考書等を使って調べよ。
4. スズの冷却曲線中凝固点に達する直前に温度に不安定な振る舞いが見られるかもしれない (図 3.5 矢印の部分)。もし, 自分の測定した結果にそれが認められたならその原因を考えてみよ。

(参考書: 「理科年表」国立天文台編/丸善など)

実験4 ボルダの振り子

1 目的

Borda の振り子を用い、その地の重力の加速度 g を測定すること。

2 理論

図のように、水平固定軸 O のまわりに鋼体の重力による回転運動の方程式は、空気・支点到抵抗などを無視すれば、

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = -Mgh \sin\theta \quad (4.1)$$

ここで、 θ は、鉛直線と、支点 O と重心 G を結ぶ直線間の角で、それが相当小さい (5° 以下) ならば、

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{Mgh}{I} \sin\theta \quad (4.2)$$

ゆえに、短振動の周期を T とすれば、

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{Mgh}} \quad (4.3)$$

$$g = \frac{4\pi^2}{T^2} \frac{I}{Mh} \quad (4.4)$$

ところで、 I は支点 O のまわりの慣性モーメントであるから、図 4.1 のように、針金の長さ ℓ 、球の半径 r の Borda の振り子においては $h = \ell + r$ であって、

$$I = M(\ell + r)^2 + M\frac{2}{5}r^2 \quad (4.5)$$

$$g = \frac{4\pi^2}{T^2} ((\ell + r)^2 + M\frac{2}{5}r^2) \quad (4.6)$$

ゆえに、その地の g を測定するには、周期 T 、針金の長さ ℓ 、球の半径 r を測定すればよい。

3 実験方法

まず、壁に取りつけられた台 A の上に U 字形水平台 B をのせる。 B に水準器をのせ、ねじ C_1 、 C_2 を調節して、これを水平にする。次にエッジ E に約 1 m の針金をつけ、これを球形錘 G につけ、図 4.1 のように置き、10 回ほど振らせて周期 T を測定してみる。さらに、針金と球錘をはずして、エッジ DEF だけ 10 回ほど振らせてその周期 T' を測定し、 T' が T に等しくなるよう、ねじ D を調整する。これは、エッジに対する強制振動を共振の状態にして、なるべく全体の周期に影響なくするためである。

以上の準備ができたなら、今度は本式に周期を測定する。まず、鉛直線と 5° ぐらいの角をなすよう球錘の H を糸 K で水平につり、これを焼き切れれば短振動をする。もし、これがだ円軌道を描くようならば、やり直すがよい。次に、周期の測定は、最も細心の注意を要する。一人が望遠鏡で振り子の運動を観測して、針金が視野において振動の中心 N を左から右に通過する瞬間を合図すれば、共同者が時計を注視しており、同一の方向に通過する時刻を 10 回ごとに $1/10$ 秒まで読みとって記録し、表 4.1 のように平均値をとれば、合理的な平均周期を求めることができる。

最後に、エッジから球錘表面までの長さ ℓ を物差しで求め、球錘の直径をノギスから求め、半径 r を算出すれば、

$$g = \frac{4\pi^2}{T^2} ((\ell + r)^2 + M\frac{2}{5}r^2) \quad (4.7)$$

から、その他の重力の加速度 g を算出することができる。

4 注意

振り子の振動の回数をまちがえないか点検のために、10 回ごとの所要時間を計算する。この値が 2 秒程度異

表 4.1: 振り子の周期測定

回数	時刻	回数	時刻	$100T = t_2 - t_1$
0	0 分 14.2 秒	100	3 分 45.9 秒	3 分 31.7 秒
10	0 分 35.4 秒	110	4 分 07.3 秒	3 分 31.7 秒
20	0 分 56.9 秒	120	4 分 28.5 秒	3 分 31.6 秒
30	1 分 17.8 秒	130	4 分 49.8 秒	3 分 32.0 秒
40	1 分 39.1 秒	140	5 分 10.8 秒	3 分 31.7 秒
50	2 分 00.3 秒	150	5 分 32.3 秒	3 分 32.0 秒
60	2 分 21.5 秒	160	5 分 53.1 秒	3 分 31.6 秒
70	2 分 43.0 秒	170	6 分 14.6 秒	3 分 31.6 秒
80	3 分 03.7 秒	180	6 分 35.7 秒	3 分 32.0 秒
90	3 分 24.8 秒	190	6 分 57.1 秒	3 分 32.8 秒

なっていたら、数えすぎか数え落としの可能性が高い。
 このときは、再測定を行う。ただし、重力加速度の計算には、教科書のやり方で求めた周期を用いること。

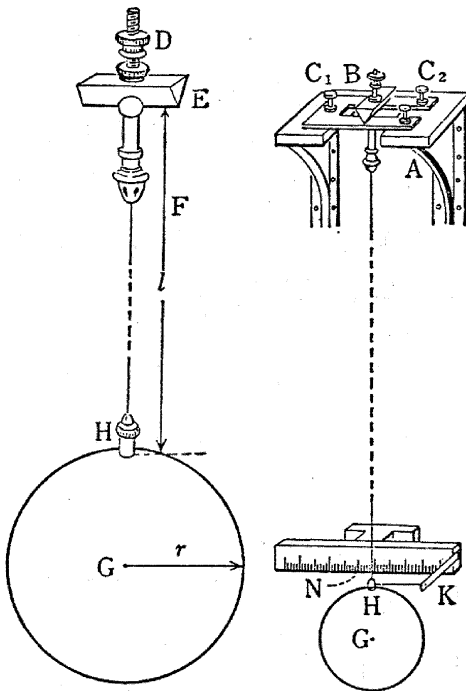


図 4.1: 装置の取り付け方

実験5 金属の電気抵抗

1 目的

オームの法則を検証する。次に、四端子法により、金属線の電気抵抗およびその温度変化を測定して、抵抗率とその温度係数を求める。本実験では銅を扱う。

2 電気抵抗の理論

2.1 オームの法則と抵抗率

試料の両端に電圧 V (V) を加えると、 I (A) の電流が流れる。 V と I との間には比例関係があり、いわゆるオームの法則

$$V = IR \quad (5.1)$$

が成り立つ。その比例係数 R が電気抵抗または単に抵抗 (electrical resistance) と呼ばれており、単位は (Ω) である。抵抗は試料の長さ ℓ (m) に比例し、断面積 S (m^2) に反比例するので

$$R = \rho \frac{\ell}{S} \quad (5.2)$$

と書ける。ここで、比例係数 ρ は比抵抗または抵抗率 (electrical resistivity) と呼ばれており、単位は (Ωm) である。抵抗率は電圧および電流によらないが、物質の種類や状態 (温度、磁場など) によって変わる。

2.2 金属の電気抵抗の温度変化

金属の電気抵抗の温度変化は、一般に次の様に、温度 T に依存しない項と、温度 T に比例する項との和で表わされる。

$$R = R_0 \{1 + \alpha(T - T_0)\} \quad (5.3)$$

ここで、 R_0 は温度 T_0 における抵抗の値で、 α は温度 T_0 における抵抗の温度係数である。この式は温度差のみに依る式なので、温度は絶対温度 (K) でもセ氏 ($^{\circ}\text{C}$) でもどちらでもよい。

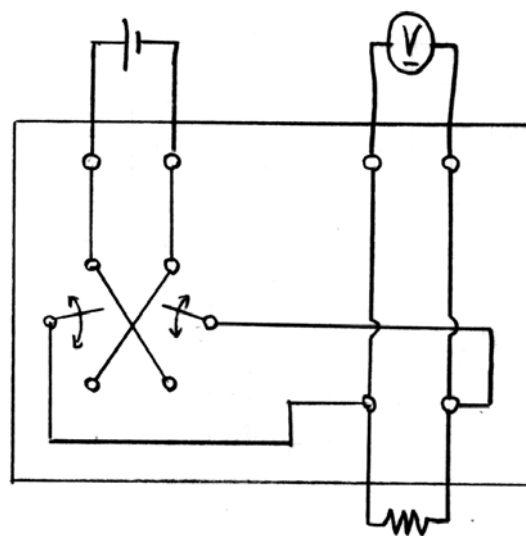


図 5.1: 配線図

3 装置

定電流電源、デジタルマルチメータ (DMM)、試料線、温度変化測定用装置、マントルヒーター

4 実験

4.1 オームの法則

- (1) 装置の電源が全てオフであることを確認したのち、図 5.1 のように結線する。電源方向切り替えスイッチをどちら側かに入れる。
- (2) 定電流電源 (図 5.2) のスイッチ を押して 0.25(A) のレンジにする。電圧つまみ と電流つまみ を図のように反時計方向にいっぱい回した後に、スイッチ を押して電源を入れる。
- (3) DMM のレンジを VDC (V $\overline{\text{---}}$ 、直流の電圧) の位置にあわせた後に電源を入れる。

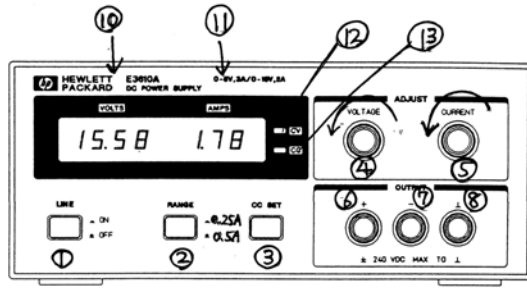


図 5.2: 定電流源

- (4) 電圧つまみ を緑の印の付いているところに合わせた後に、電流つまみ を回して回路に流れる電流を調整する。0 A から 0.1 A の間の各電流値での電圧を読み取る。
- (5) 測定と同時に、横軸に電流、縦軸に電圧をとったグラフを書く。測定点を通るような直線を引く。その直線は原点を通るか。もし通らない場合はその理由を考えよ。

注意：電流方向を変えるときには、必ず電圧つまみを 0 に戻してから切り替える。装置の故障やショートの原因となるので必ず守ること。

4.2 金属線の電気抵抗の測定と抵抗率の算出

- (1) 定電流電源の電流つまみ を回して回路に流れる電流 I を 0.100 (A) に調整する。この時の DMM の電圧 V_1 を読み。
- (2) 電圧つまみ を 0 に戻してから、電流方向切り変えスイッチにより電流の流れる方向を変えよ。電圧つまみ を緑の印の付いているところに合わせて、この時の DMM の電圧 V_2 を読み。
- (3) 金属線の抵抗を $R = \frac{V_1 - V_2}{2I}$ の式に従って求めよ。
- (4) 金属試料線の抵抗率を式 5.2 に従って計算せよ。金属線の長さや直径は実験室に表示してある。

注意：このような四端子法によって抵抗を測定する理由は物理学実験 II で扱う。

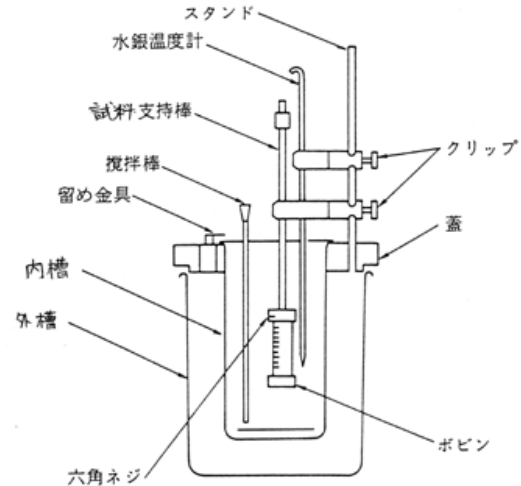


図 5.3: 温度変化装置

5 金属線の電気抵抗の温度変化の測定

- (1) 図 5.3 に示す温度変化測定用装置が、マントルヒーターの中に置かれている。温度変化測定用装置の外槽に 8 分目程度まで水が入っていることを確かめよ。不十分な場合はビーカーを用いて注ぎたせ。このとき、水をマントルヒーターや内槽にこぼさないように注意せよ。
- (2) 図 5.1 のように結線する。まず室温で、試料線の抵抗を 4.2 の方法で測定せよ。
- (3) マントルヒーターのダイヤルが OFF になっていることを確かめた後に、マントルヒーターのプラグを 100 V のコンセントに差し込め。
- (4) マントルヒーターのスイッチを押し回して「5」の目盛りに合わせる。内槽の温度を一樣にするために、測定中は攪拌棒を用いてよく攪拌すること。
- (5) 室温から 90°C ぐらいまでの間に 10 点ほど、抵抗値とそのときの温度を測定せよ。抵抗測定の実験技術が未熟な場合は、マントルヒーターの目盛りを下げてゆっくりと温度を上昇させよ。ゆっくりしたほうが失敗が少ない。
- (6) 測定と同時に、図 5.4 の様なグラフを描くこと。

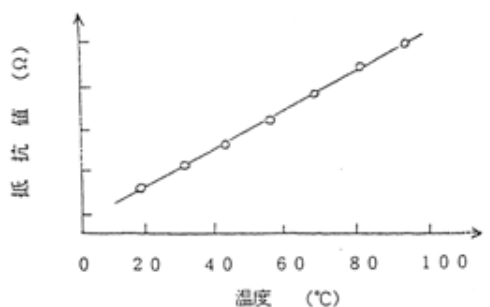


図 5.4: 抵抗の温度変化

- (7) 次に、 0°C における抵抗を R_0 、 100°C における抵抗を R_{100} とすると、 0°C と 100°C の間の平均温度係数 $\alpha_{0,100}$ を

$$\alpha_{0,100} = \frac{1}{R_0} \frac{R_{100} - R_0}{100} \quad (5.4)$$

で定義する。この式に従って、 $\alpha_{0,100}$ を求めよ。ただし、 0°C と 100°C の抵抗値はグラフを延長して外挿法により求めよ。

6 課題

本実験では銅線を用いた。実験から得られた抵抗率、温度係数を文献値と比較せよ。

7 補足

金属の R はかなり広い温度範囲にわたって式 5.3 に従って変化することが多いが、上式の定義では、 α は T_0 によって変わることには注意しなければならない。すなわち、 R の傾き dR/dT はほぼ一定であるが、 R_0 が T_0 によって変化するので、

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{dR}{dT} \quad (5.5)$$

より、 α は温度に依存する。本実験では測定温度範囲が狭いので、式 5.3 の α は一定とみなしてよい。

8 参考文献

理科年表（国立天文台編）

実験6 液体の比熱

1 目的

基礎的かつ重要な物理量である比熱についての認識・理解を深める。冷却法によりエチルアルコールの比熱を測定し、この際に用いる、データ処理に有効なグラフの使い方を取得する。

2 比熱の定義と測定原理

温度 T [K] (ケルビン・絶対温度の単位: $0\text{ }^{\circ}\text{C} = 273.15\text{ K}$) にある質量 m [g] の物体を T から微小温度 ΔT だけ上の温度 $T + \Delta T$ [K] へ上昇させるのに要した微小な熱量を ΔQ とすると次の物理量

$$K = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (6.1)$$

をその物体の**熱容量**と呼ぶ。熱容量を求める際にはその物体の質量 m がいくつであるかという情報を必要としないことに注意する。熱容量は温度を 1 K 上げるのにどれだけ熱エネルギーが必要かを表す量で、これは異なる物質であっても質量が違えば同じ熱容量となる場合があるので、本来物質が持つ固有な性質に起因する普遍的な物理量にはならない。そこで、そのような物質の本来持つ固有な熱容量として定義されるものが比熱である。

比熱 C は、単位質量あたりの熱容量として定義される。すなわち単位質量の物質の温度を 1 K 上昇させるのに必要な熱量である。このように各々の物質の質量を同じにした場合の熱容量を考えると、物質が本来もつ個性に起因する量として意味を持つことになる。

$$C = \frac{K}{m} = \frac{\Delta Q}{\Delta T \cdot m} \quad (6.2)$$

単位質量はここでは [g] (グラム) を用いる。熱容量の単位は [cal/K]、比熱の単位は [cal/K · g] である。
 $1\text{ cal} = 4.2\text{ J}$ (ジュール) と変換される。

比熱を測定する方法は、数多く開発されているが、ここでは**冷却法**を用いてエチルアルコールの比熱を測定することにする。ある物体「X」が、熱容量の極めて大きな温度一定の外界に取り囲まれているとする。X と外界との温度が生じているとき、X は取り囲まれている外界へ熱エネルギーを放出することにより、十分時間が経過した後、外界の温度と同じになろうとする。(熱平衡に達するという)。X が熱を失い温度を下げる時間的割合は、初めに X と外界との間で生じている温度差に比例することが知られている。(温度差があればあるほど温度の下がり方は激しい。)

ある液体 X を容器に入れて温度を下げる場合を考える。液体 X と液体を入れる容器の温度を T [K]、外界の温度を T_0 [K]、液体の質量を m_X [g]、その比熱を C_X [cal/K · g]、液体を入れる容器の熱容量を K_0 [cal/K] とすると、液体 X と容器を一体とした系の温度変化の時間的割合は次の微分方程式から導かれる。

$$(K_0 + m_X C_X) \frac{dT}{dt} = -\sigma(T - T_0) \quad (6.3)$$

ここで、 σ [cal/K · sec] は物体の表面の広さ (表面積) やその状態によって決まる定数 (これは一定であると見なしてよい。)、 t は温度が下がり始める時から数えた時刻 [sec] である。右辺の負符号は温度が下がる過程を考えていることを表している。温度の時間変化率 $\frac{dT}{dt}$ は上述したように温度差 $(T - T_0)$ と定数 σ が大きいほど大きくなることがわかる。

式 (6.3) を多少変形した後、その両辺を時間について積分すると次の式が得られる。

$$\log(T - T_0) = -\frac{\sigma \log e}{K_0 + m_X C_X} t + A \quad (6.4)$$

(ここで、 A は積分定数を表す。)

この式より、 $\log(T - T_0)$ と時間 t の間には積分定数を除くと比例関係のあることがわかる。(図 6.1 を参照) この関係を用いて液体 X の比熱 C_X を求める。

具体的には温度 T_0 の熱容量の大きな (従って温度が一定とみなし得る) 物体に取り囲まれた、熱容量が

$(K_0 + m_X C_X)$ の物質の冷却過程においてその温度 T と温度降下開始からの時間 t を測定し、 $\log(T - T_0)$ と時間 t の関係を表すグラフ (図 6.1) を作ると、正しく測定されれば直線のグラフが得られる。得られた直線の傾きを α [sec^{-1}] とすると容易に式 (6.4) から、

$$\alpha = -\frac{\sigma \log e}{K_0 + m_X C_X} \quad (6.5)$$

となることがわかる。式 (6.5) 中のグラフの傾き α 、容器の熱容量 K_0 、液体の質量 m_X は、測定によって直接求めることができるから、未知量は C_X と σ である。最終的に知りたいのは比熱であるから、まず σ を求めることから行う。そのためには、比熱 C_X が既にわかっている物質 (参照物質という) の冷却過程から α を求めて、式 (6.5) から σ を求める。ここでは、参照物質として水を用いる。その後比熱を知りたい物質の質量 m_X と、その冷却グラフから改めて α を求めれば、 σ が既知となっているので、結局、 C_X が求められることになる。

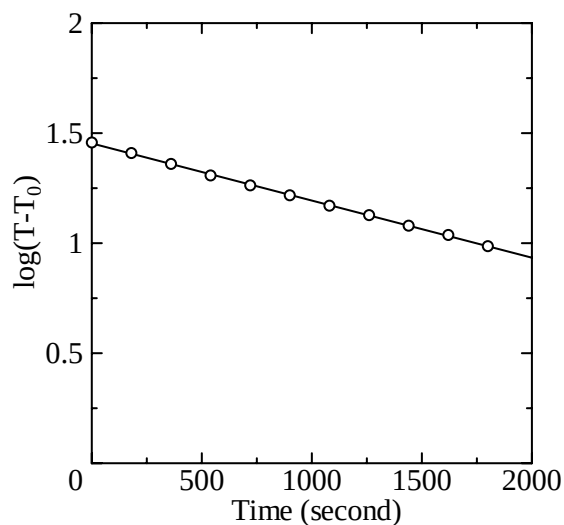


図 6.1: 液体の冷却グラフ

3 実験装置と実験方法

*実験に際しては、各自**卓上計算機 (関数電卓)**と**1mm 方眼紙**を持参する。

図 6.2 に用いる装置の略図を示す。冷却槽 A は、金属 (銅) でできた二重の容器である。そのなかに加熱さ

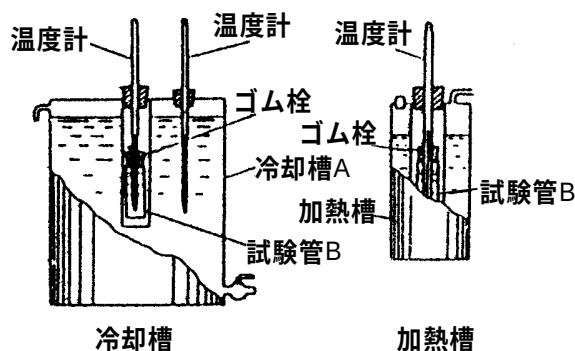


図 6.2: 冷却法による比熱測定装置

れた液体の入った銅製の試料管 B を温度計で支えて吊るす。冷却槽 A の中には水が大量に入っており、熱容量を大きくすることによって温度 T_0 が変化しないようになっている。図中の斜線の部分は、ゴム栓で作られ、液体漏れを防ぎ、かつ外部との熱の出入りを遮断している。

[A] まず、液体を入れる試料管 B の熱容量 K_0 を求めるために、試料管 B の重さと液体中に入る温度計の体積を測定する。(K_0 の計算は後でも良い。)

1. 銅製の試料管 B の重さ M [g] を天秤で測る。
2. 試料管に入れる温度計のゴム栓下部より下に出る部分の長さおよび直径をノギスで測り、円柱形をしていると仮定し、体積 V [cm^3] を求める。これらの量から試験管 B の熱容量 K_0 を次式より求める。

$$K_0 = 0.0991M + 0.45V \quad [\text{cal/K}] \quad (6.6)$$

[B] 次に水の冷却グラフを求める。

1. 水を銅製の試料管に入れ、試料管ごと質量を測り水の質量 $m_{\text{水}}$ を求める。
2. 図 6.2 にあるように、水を入れた試料管を加熱槽に入れ電熱器で加熱する。

注 加熱槽を暖めるのにやや時間を要するので、実験開始時に加熱を開始した方がよい。加熱槽の温度が 100°C になると水蒸気が吹き出て、火傷する恐れがあるので十分気をつけること。

- 試料管の温度が 50°C を越えたら、試料管を冷却槽 A へ移す。このとき、試料管 B が冷却槽 A の内壁に接触しないように固定する。試料管 B を固定したらそのまま、冷却槽の状態が落ち着くまで 10 分程度待機する。(試料管をセットした直後は良いデータがとれない傾向があるため)
- 待機した後、適当な時刻から測定を開始する ($t = 0$)。測定は 3 分毎に 30 分間行う。測定では、以下の数値を記録する。(開始時刻からの経過時間 t が正しく記録されていれば厳密に 3 分である必要はない。大体の目安として 3 分前後が適当であろう。) 温度は小数第 1 位まで測る。

- 測定開始時刻からの経過時間 t [sec]
- 冷却槽の温度 T_0 [$^{\circ}\text{C}$]
- 試料槽の温度 T [$^{\circ}\text{C}$]

- 測定の合間に電卓で(持っていない場合は教官か、TA に連絡すること)、 $\log(T - T_0)$ (常用対数を用いる) を計算してグラフ用紙に縦軸に $\log(T - T_0)$ 、横軸に t の冷却グラフを描き、直線関係があることを確認する。

[C] 水に関して、きれいな直線を示すデータが得られたら試料管 B の中の水を捨てて、それに代わってエチルアルコールを入れ、[B] と同様の手順で冷却グラフを作成する。この際、エチルアルコールの質量 $m_{\text{アルコール}}$ を求めることを忘れないこと。エチルアルコールは引火しやすいので加熱に際しては 60°C を越えないように注意すること。また、アルコールを試料管に満杯に入れると温度上昇に伴いアルコールがあふれ出てくるので、8 分目程度にとどめておくほうがよい。

4 データの解析

得られた水とエチルアルコールの冷却グラフから各々の直線の傾き $\alpha_{\text{水}}$ 、 $\alpha_{\text{アルコール}}$ を求める。式 (6.5) を適用した下の連立方程式から定数 σ を消去して、 $C_{\text{アルコール}}$ を求める。

$$\alpha_{\text{水}} = -\frac{\sigma \log e}{K_0 + m_{\text{水}} C_{\text{水}}} \quad (6.7)$$

$$\alpha_{\text{アルコール}} = -\frac{\sigma \log e}{K_0 + m_{\text{アルコール}} C_{\text{アルコール}}} \quad (6.8)$$

ただし、 m の単位は [g] で計算する。この結果を実験で求めた直接的データ (試料管の重さ、温度計の直径および長さ、温度の測定データなど)、作成した冷却グラフ、および解析過程とともにレポートにまとめよ。

エチルアルコールの比熱は、 40°C において $2.71 [\text{J}/\text{K} \cdot \text{g}] \approx 0.64 [\text{cal}/\text{K} \cdot \text{g}]$ とされている。自分で行った測定の結果得られた値と比べてどうか。もし値が大きく異なっていたらその原因について詳細に考察せよ。ただし、比較する際、単位に注意せよ。

実験7 レーザー光の回折

1 目的

レーザー光の回折現象を通して、光の干渉、回折等について学ぶ。単スリットのスリット幅の実測からレーザー光の波長をもとめ、得られた波長から、逆に、微細な回折格子の格子間隔を計算する。

2 解説

2.1 レーザー光 (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

光の波 (図 7.1) は、一般に $\psi = A \sin(k(x - ct) + \delta)$ と書き表わすことが出来る。ここで ψ は電場または磁場の大きさ、 A はその振幅、 $\sin$ の () の中の量は位相である。

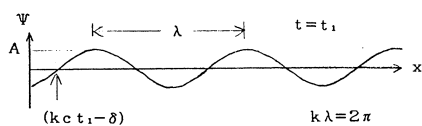


図 7.1: 波の波長、振幅、位相

重ね合わせの原理

2つの波 ψ_1 、 ψ_2 の合成波 ψ は $\psi = \psi_1 + \psi_2$ であらわせる。これを重ね合わせの原理という。これにより、二つの波の位相が一致している時 ($= 2\pi$ の整数倍のずれ) 合成された波は強め合い、位相が π だけずれている時合成された波は弱め合う。

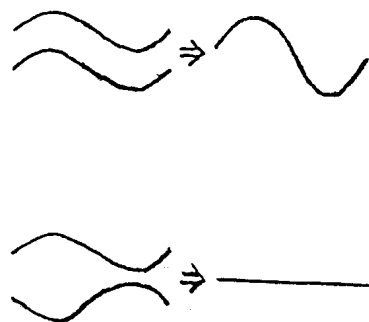


図 7.2: 波の重ね合わせ

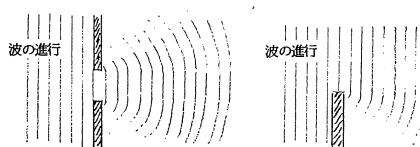


図 7.3: 光の回折

光の回折 (diffraction)

光は、その波長が短いのでほとんど直進するが、詳しく調べてみると、物体の影の部分にも回り込んで波がくる。この現象を回折と言う。

干渉

二つの波の位相の差が常に一定の時、その合成波は、重ね合わせの原理により、強め合ったり、弱め合ったりする。このような光を干渉性のある光といい、このような現象を光の干渉という。逆に、二つの波の位相の差が不規則に (ランダムに) 変わる時、合成波は全体として強めあったり弱め合ったりしない。このような光を非干渉性の波という。

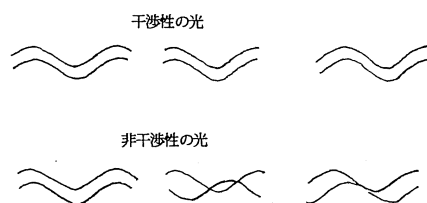


図 7.4: 干渉性の光、非干渉性の光

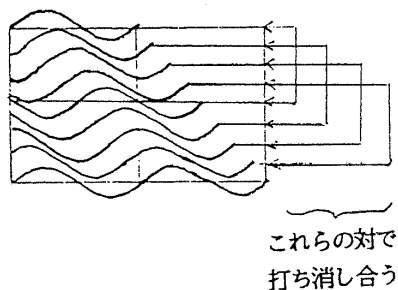


図 7.5: 波の打ち消しあい

(干渉の仕方 1)

2つの波が同位相の時、合成波は強め合って振幅が2倍になり強くなる。2つの波の位相差が π の時、合成波は打ち消し合って弱め合う。

(干渉の仕方 2)

多くの波の位相が連続的に 2π まで変化している時、それらをすべて重ね合わせると打ち消し合って弱くなる。即ち、暗い点となる。多くの波の位相が、連続的に 3π まで変化している時、それらをすべて重ね合わせると、0から 2π までの波は打ち消し合って弱くなるが、 2π から 3π までの波は、打ち消されないで残る。即ち、明るい点となる。

白色光と単色光

太陽の光のように、色々な波長の光が混ざっている光を白色光という。プリズムで光を分けると、すべての色(7色)が分離されることが分かる。普通の白色電球の光も白色光である。これに対し、唯一の波長をもつ光を単色光という。

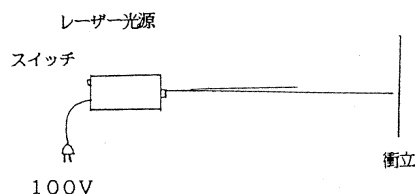


図 7.6: レーザー光源についての配置図

レーザー光

1. 可干渉性(コヒーレンス)

空間的コヒーレンス: 光波の波面が光束全体にわたって一様にきれいに広がっていること

時間的コヒーレンス: 長時間にわたって光波が正弦波をなしてつながっていること。

2. 単色性(モノクロマティック)

2つのエネルギー準位の差によって決まる光だけが増幅され単一の周波数の光が取り出される。

3. 指向性(ディレクショナル)

光の指向性は空間的コヒーレンスに関連しており、空間的に位相がそろったコヒーレンスな光束は回折によりわずかに広がるのみで一般には鋭い指向性をもつ。レーザー光の特徴は、単色性、干渉性、指向性が強く、輝度が明るいことである。

3 装置

レーザー光源、スリット幅可変のスリット、ステンレス製のさし、衝立、スタンド、スライド(回折格子、その他)、2m用メジャー

(注意) レーザー光源の発生装置に絶対に衝撃を与えないこと。

4 実験

4.1 レーザー光の拡がり角をもとめる

- (1) 図 7.6 のようにレーザー光源、衝立を配置する。
- (2) レーザー光発生装置のスイッチをいれよ。すぐに、レーザー光が発射される。赤色のレーザー光がでていることを確認せよ。

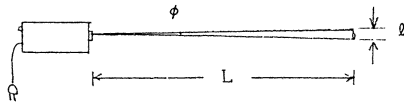


図 7.7: レーザー光の拡がり角

(注意) レーザー光を直接目で見ないこと。レーザー光を他人の顔にあてないこと。

- (3) まず、指向性の強いことを確認しよう。遠くの壁にレーザーのスポットを写し、壁までの距離 L とスポットの直径 l を測定し、レーザー光線の拡がり角 $\phi = l/L$ を求めよ。 L が長いほど ϕ は正確に求まる。

4.2 単スリットを用いてレーザー光の波長をもとめる

- (1) 図 7.8 のように、レーザー光源、可変スリット、衝立を配置する。スリットと衝立の距離 L を 1.5 m ぐらいにせよ。

- (2) スリット幅 $2a$ を 1 mm ぐらいにしてレーザー光を通して、衝立にスポットを写せ。スリット幅を、徐々に、狭くしてゆくと衝立上のスポットは、だんだんと横に拡がり、明暗が現われる。これが回折像である。スリット幅調整はマイクロメータのつまみを回して行う。小さな 1 刻みは本来 0.01 mm であるが、刻みとスリット幅の関係は壁に貼ってある表を使う。

(注意) スリット幅調整つまみは、バックラッシュ(歯車の噛み合わせの余裕のためのずれ)を伴う。したがって、スリット幅の値を正確に決めるために、本実験では大きいほうから小さいほうへ狭め、途中で逆転しないこと。

- (3) スリット幅 $2a$ と回折像の最初の暗の位置 x_D の組み合わせを、数セット測定せよ。この位置の測定の仕方は、スクリーンにグラフ用紙をはりつけ、暗い部分の中心位置に鉛筆で印をつけて、それを読み取るのが一つの方法である。

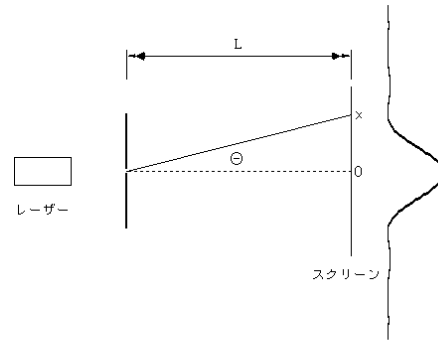


図 7.8: 波長測定のための配置図

- (4) 回折像の中心(ダイレクトビームの位置)を原点とすると、スクリーン上の位置 x と θ の関係は、 $L \gg x$ の時

$$\sin \theta = x/L \quad (7.1)$$

である。暗点の位置は

$$2a \sin \theta_n = n\lambda \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \quad (7.2)$$

となる。したがって、スリット幅の逆数 $(1/2a)$ と、回折像の中心の両脇の暗点の位置 x_1 の間には、次の式がなりたつ。

$$x_1 = \frac{L\lambda}{2a} \quad (7.3)$$

図 7.9 のように、 x_1 と $1/2a$ のグラフを描き、その傾きより光の波長 λ を計算せよ。

4.3 波長のわかったレーザー光を用いて回折格子の間隔を決める

多数のスリット(幅 $2a$)を一定の間隔(格子間隔 $= d$)でならべたものを回折格子という。回折格子による回折像を得るために、図 7.8 の可変スリットの代わりに回折格子を配置する。

- (1) 回折格子としてスライド(回折格子 1)を用いて、回折像をスクリーンに写す。

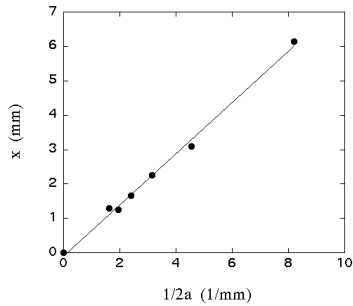
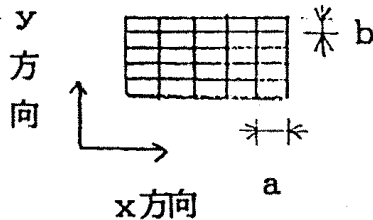

 図 7.9: $x - 1/2a$ のグラフ


図 7.10: 2次元格子

- (2) 回折像の明暗の位置 x を測定せよ。
- (3) スライドと回折像との距離 L を測定せよ。
- (4) $L \gg x$ の時、 $\sin \theta = x/L$ として

$$\text{明点: } d \sin \theta = n\lambda \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \quad (7.4)$$

から x_n と n のグラフを描き、その傾きより格子間隔 d を求めよ。

- (5) 時間があれば、格子間隔の異なる回折格子 (スライドは回折格子 2) の回折像を写し、格子間隔を求めよ。

4.4 2次元格子をレーザー光で調べ、 x 方向と y 方向の格子定数 a, b を求める

2次元格子としてスライド 3 を使い、§4.3 と同様にして、格子定数 (=格子間隔) を求めよ。2次元格子とは図 7.10 のようなものである。

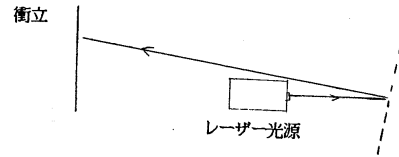


図 7.11: 背面反射

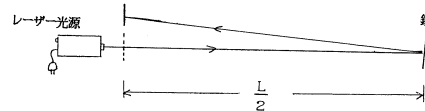


図 7.12: レーザー光を用いた距離測定

前節 §4.3 の方法で a, b をもとめることができ、この方法は透過法という。しかし、調べようとするものが光を透過しないが反射する時、背面反射法で同様のことができる。この 2 次元格子 (スライド) はよく反射する。背面反射法の回折像を観察できればよい。

(参考) $1 \text{ \AA}$ 程度の波長をもつ X 線では、実際の結晶 (格子定数: 数 $\text{\AA}$) の回折像が得られ、ラウエ斑点と呼ばれている。

4.5 レーザー光を利用して距離を計測する

レーザーと回折格子を用いて §4.3 の考え方の逆の考え方で距離 L を計る。配置は図 7.12 のようにする。

4.6 課題

- (1) 式 (7.4) を導出せよ。

実験8 Newton リング

1 目的

ナトリウムランプの単色光 ($\lambda = 589.3 \text{ nm}$) により Newton リングを作り、レンズの曲率半径を測定する、次にカドミウムランプの波長を求める。光の波動としての干渉現象を理解する。

2 理論

図 8.1 のように、十分大きな曲率半径 R を持つ凸レンズ AA' を平行ガラス板 BB' 上に置き、単色光 (波長 λ) をこれに垂直に入射する場合を考える。空気層 AB (または $A'B'$) は非常に薄いため、 A (または A') からの入射光も B (または B') からの反射光もほぼ平行とみなすことができる。そこで、 A (または A') での反射光と B (または B') での反射光との光路差を以下のように求めることができる。

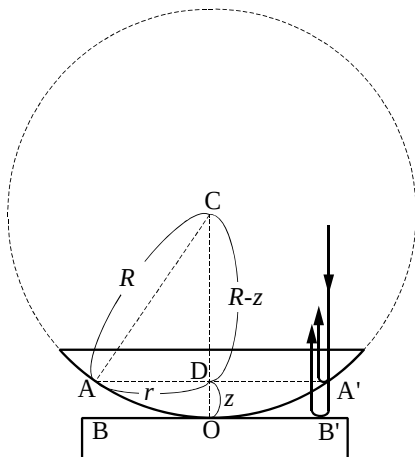


図 8.1: ニュートンリングの断面図

$AB = A'B' = OD = z$, $AD = A'D = r$, $CD = R - z$ とすれば、直角三角形 DAC に対して三平方の定理を適用して

$$R^2 = (R - z)^2 + r^2 \quad (8.1)$$

となる。これを展開し、 z は R に対して十分小さいことを考慮すると

$$r^2 = 2Rz - z^2 \approx 2Rz \quad (8.2)$$

となり、光路差は $2z = r^2/R$ となる。ところで、 A (または A') での反射は密から疎な媒質への境界の反射であり、 B (または B') での反射は疎から密な媒質への境界の反射であるから、後者のみ半波長分位相がずれる。よって、光路差が半波長の偶数倍に等しいときに**弱めあって暗くなる**。第 m 番目の暗環の半径 r_m と波長 λ との関係は

$$\frac{r_m^2}{R} = \frac{\lambda}{2} \cdot 2m$$

$$\therefore r_m^2 = m\lambda R \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (8.3)$$

従って、 $m + n$ 番目の暗環の半径を r_{m+n} とすれば、

$$r_{m+n}^2 = (m + n)\lambda R \quad (8.4)$$

式 (8.3), (8.4) の両辺を各々引いて、

$$r_{m+n}^2 - r_m^2 = n\lambda R$$

$$\therefore R = \frac{r_{m+n}^2 - r_m^2}{n\lambda} \quad (8.5)$$

図 8.2 にニュートンリングの観測例を示す。ニュートンリングの中心を通る直線と考えたとき、 a_m はこの直線と第 m 番目の暗環の交点位置を示している。図 8.2 においてはリング中心より左側の交点位置を a_m , 右側のそれを a'_m としている。

m 番目の暗環の直径を $D_m = 2r_m = a'_m - a_m$ 、 $m + n$ 番目の直径を $D_{m+n} = 2r_{m+n} = a'_{m+n} - a_{m+n}$ とすれば、これを式 (8.5) に代入して、

$$R = \frac{D_{m+n}^2 - D_m^2}{4n\lambda} \quad (8.6)$$

となる。この式を本実験の解析に用いる。

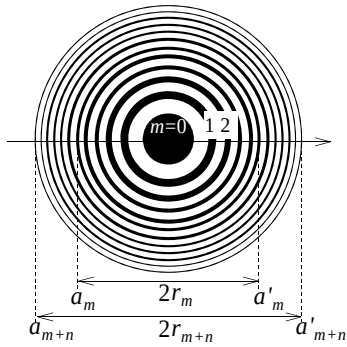


図 8.2: ニュートンリングの観測例

3 装置

平凸レンズ (曲率半径 1m 以上)、平面ガラス、ナトリウムランプ、ハーフミラー、顕微鏡、測微鏡、その他図 8.3 に示す装置

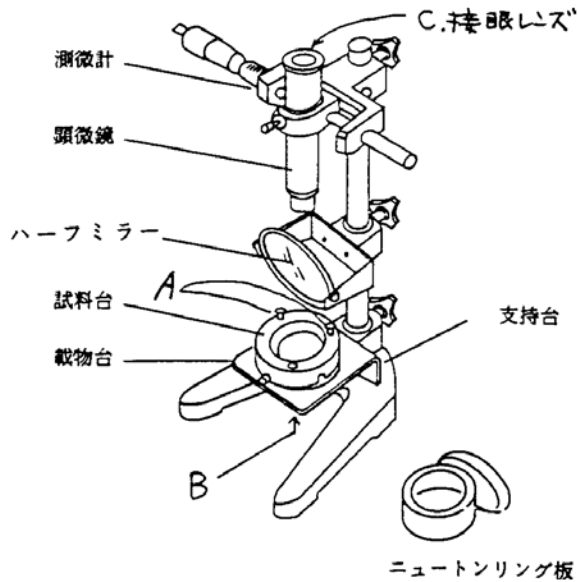


図 8.3: 装置の外観

4 実験前の準備

ナトリウムランプをソケットに挿して (極性に注意) 横にし、木の台に乗せて装置の前に置く。電源スイッチを入れ赤いボタンをしばらく押しっぱなしにするとフィラメントが温められて光り始める。数秒間この状態を保持した後赤いボタンから指を離すとランプ内で放電が始まる。この光をハーフミラーに入れる。測微

計を広い範囲で動かしてもニュートン環がよく見えるように調整する。接眼レンズを覗くと十字線が見える。十字線の縦線は測微計の移動方向に対して垂直なので、正確な実験をするためにはこの縦線をニュートンリングに接する様に合わせればよい。また接眼レンズの頭だけを回すと、十字線のピントを合わせることができる。このときニュートンリング像のピントも一緒にずれる。そこで、まず、接眼レンズの頭を回して十字線のピントを合わせ、次に測微計を支えるネジを緩め全体を上下に移動させてニュートンリング像のピントを合わせるようにする。**十字線の焦点調整は接眼レンズ全体を回すようにすること。**

5 注意

1. 平凸レンズは平面ガラスの上に載せるだけでもよい。覆いの調節ネジ A を強く抑えようとレンズ面に歪を生じるので、適当な強さで抑えること。
2. ハーフミラーと平凸レンズのガラス部分には手で触らないようにすること。
3. ランプのガラス部分は極力触らないように注意すること。汚れるとランプの寿命が落ちます。

6 実験

6.1 実験 I

1. 最初はナトリウムランプを使う。ニュートン環の中心から順に番号を 0, 1, 2, ... とつける。中心部の暗環の幅が広く測定誤差をとまなうので暗環の測定は $m = 5, 6, 7, \dots, 14$ までの 10 本について行なう。
2. 測微計のマイクロメータは逆に回すとネジの遊びで誤差を生じるので、ネジを押し込むような方向に動かして測定するようにする。
3. 顕微鏡をのぞきながらマイクロメータを左に回し暗環の $m = 14$ 以上の外側まで動かし、次にマイクロメータを右に回し、 $m = 14$ の暗環の中央に十字線の交点を合わせ、マイクロメータの読み a_{14} を記録する。順次内側に顕微鏡を移動し暗環

の位置 $a_{13}, a_{12}, a_{11}, \dots, a_0$ を読む。さらに中心を越えて、こんどは半径の大きくなる方向に $a'_0, a'_1, \dots, a'_{13}, a'_{14}$ を読み測定結果を表にまとめよ。

- 各環の直径 D_m ($\equiv a_m - a'_m, m = 5, 6, \dots, 14$) の 2 乗を計算した後、10 本の環を外側の 5 本と内側の 5 本に分け、 $D_{14}^2 - D_9^2, D_{13}^2 - D_8^2, \dots, D_{10}^2 - D_5^2$ を求める。これらの値はほぼ同じ値となるはずである。もしばらついていたら、測定ミスや計算ミスの可能性があるので見直してみる。ばらつきがなければ、それらの平均値を求め、式 (8.6) よりレンズの曲率半径 R を計算する。

6.2 実験 II

次にレンズの曲率半径 R が分かったので、ナトリウムランプをカドミウムランプに替え同様の測定を行ない、カドミウムランプの波長を求めよ。求めた波長を文献値 (例えば、理科年表) を参考に比較し考察せよ。

7 参考

- ニュートン環の明暗じまは、暗環のほうが細く見えるので精度が高く一般には暗環で測定するが明環で測定してもかまわない。その場合計算方法は同じである。
- ナトリウムの D 線は 589.6nm、589.0nm の 2 本の線から成っているが、ニュートン環では 2 本に分離されないの λ としては平均の 589.3nm として扱う。環径の測定精度も 0.1% 程度の近似で問題とはならない。
- 十字線の合わせ方
十字線をすべてのリングの中心に合わせて、次にマイクロメーターを動かし十字線を右方向に移動させる。この時、十字線はリングの中心を通る直径上を移動するようにしなければ正確な測定値が得られない。従ってマイクロメーターで十字線を移動させるとき、直径上からずれないように接眼レンズを回転させて調整しなければならない。
- マイクロメーターの使い方
D は mm 尺度、E はこれと 1/2mm ずれている

mm 尺度、F は円筒を 50 等分したダイヤルである。DE により 0.5mm まで、ダイヤル F により 1/100mm まで、更にその読みに目分量を入れて 1/1000mm まで読みとることができる。図 8.4、8.5 に例をあげた。

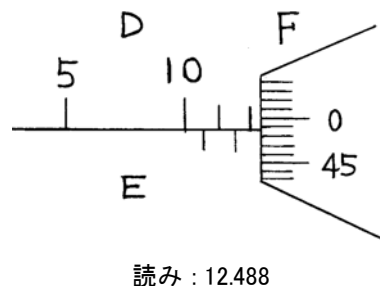


図 8.4: マイクロメータの読みの例 1

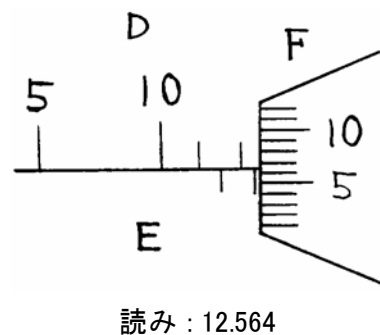


図 8.5: マイクロメータの読みの例 2

実験9 光の屈折

1 目的

波動が異なる媒質の境界面を通過する際、一般に進行方向を変える。この現象を屈折という。屈折の現象を、空気と水の境界面での光の屈折現象を観測することにより体験する。

2 理論

波動が図 9.1 のように媒質 1 から媒質 2 へ進入したとする。境界面の法線方向と入射波および屈折波の進行方向のなす角、すなわち、入射角 θ_1 と屈折角 θ_2 の間には次式で示されるスネルの法則が成り立つ。

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (9.1)$$

ここで、 λ_1 、 λ_2 はそれぞれ媒質 1 および 2 における波長で、 n_1 、 n_2 はそれぞれ媒質 1 および 2 における屈折率である。式 9.1 で $n_1/n_2 < 1$ の場合には、媒質 2 中

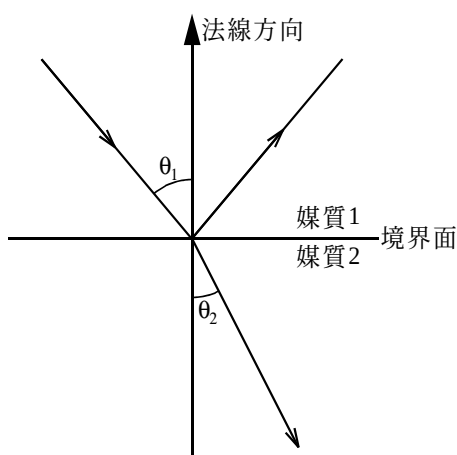


図 9.1: 入射角 θ_1 と屈折角 θ_2

に波が侵入しない全反射が生じる (この時、 $\theta_2 = 90^\circ$ である)。 θ_1 の中で最も大きな角度 θ_C からスネルの法則を用いて n_1/n_2 を求めることができる。

3 実験

3.1 実験準備

- (1) 実験装置の全体図を図 9.2 に示す。

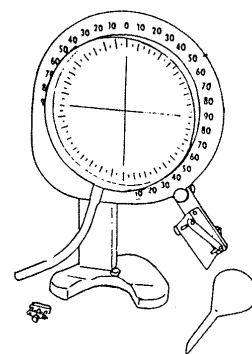


図 9.2: 実験装置全体図

- (2) 図 9.3 のレーザー光源のスイッチを入れて、レーザー光がでるようにする。

注意 レーザー光を目に当てないように注意する。

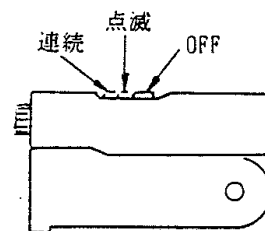


図 9.3: レーザー光源

- (3) 図 9.4 のつまみ B をゆるめて、水槽中央の十字線を中心にレーザーのライン光が通るように合わせる。合わせ終わったらつまみ B を締める。

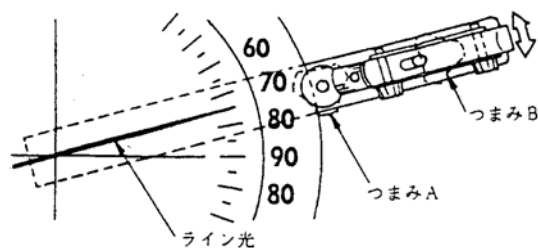


図 9.4: 光軸の調整

- (4) 図 9.5 のようにピンチコックを閉じて、水が水槽の半分を占めるようにする (空気と水の境界面が 90° のラインを結ぶようにする)。このとき、水槽が水平になるように台を調節する。

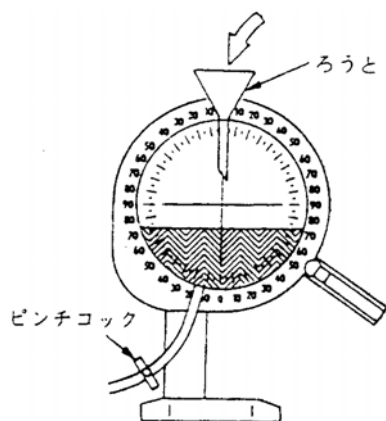


図 9.5: 水の注入

3.2 全反射から屈折率を求める

- (1) レーザー光源を最下端に移動させる。
- (2) 空気側に光が出てくるまで入射角を少しずつ大きくしていく。空気側に光が出てくるときと、出てこないときの境界の角度 (臨界角度) を求めよ。空気の屈折率を 1 とし、臨界角度から水の屈折率を求めよ。

3.3 入射角と屈折角から屈折率を求める

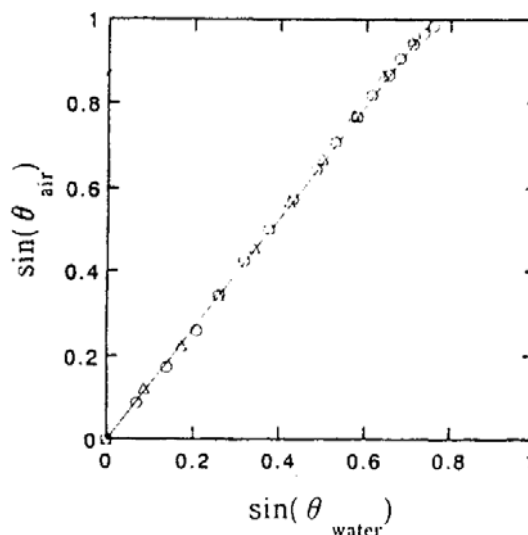
- (1) 空気側から入射させる。 5° と 80° の間で 5° おきに空気側の入射角を変えて、それぞれの場合の屈折角を測定する。

- (2) 水側から入射させる。 5° と臨界角の間で 5° おきに空気側の入射角を変えて、それぞれの場合の屈折角を測定する。

- (3) 空気側の角度を θ_{air} 、水側の角度を θ_{water} 、空気の屈折率を 1 とすると、スネルの法則は、

$$\sin \theta_{\text{air}} = n_{\text{water}} \sin \theta_{\text{water}} \quad (9.2)$$

となる。図 9.6 のように θ_{air} と θ_{water} のグラフを書き、その傾きから水の屈折率を求めよ。

図 9.6: $\sin \theta_{\text{water}}$ と $\sin \theta_{\text{air}}$ のグラフ

3.4 終わり方

- (1) レーザー光源のスイッチを切る。
- (2) ピンチコックをはずして水槽から水を出す。まわりに水をこぼさないように注意する。

4 課題

実験から得た水の屈折率を文献値と比較せよ。レーザー光の波長は 650nm である。

5 参考文献

理科年表 (国立天文台編)

実験10 半導体の電気抵抗

1 目的

半導体 (ゲルマニウム) の電気抵抗率の温度依存性を測定し、エネルギーギャップを求める。

2 測定方法

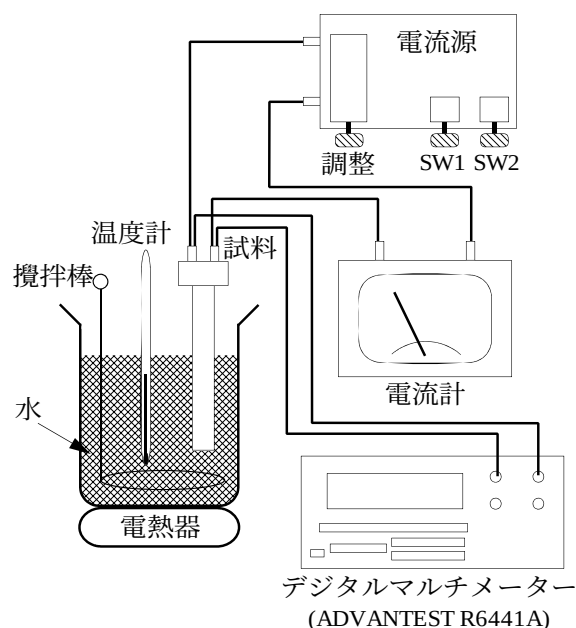


図 10.1: 測定装置の配線図

1. 試料容器に約 1.5 リットルの水を入れ、試料と温度計の位置が水中で同程度になるようにする。そして、容器を電熱器の上に置く。
2. 試料、直流電源およびデジタルマルチメーターを図 10.1 のように接続する。
3. 直流電源の SW1 を OFF から “1” にする。つぎに SW2 を OFF から “N” にする。そして、電流調整つまみを回して電流計を見ながら $6\mu\text{A}$ に合わせる。

4. 電圧 V_x の測定には、デジタルマルチメーター (ADVANTEST R6441A) を用いる。
5. 試料の抵抗 R は、 $R = V_x / \text{電流値}$ である。電流を $6\mu\text{A}$ としたときと $3\mu\text{A}$ としたときの試料両端の電圧 E_x を測定し、オームの法則が成立していることを確かめる。
6. 電熱器のスイッチを入れ、試料温度を上昇させながら、 5°C 毎に約 90°C まで抵抗を測定する。
7. 温度が 90°C を越えたら、電熱器のスイッチを切る。
8. 測定が終わったら、直流電源のスイッチを SW2 を OFF、次に SW1 を OFF の順にして切る。デジタルマルチメーターの FUNCTION スwitch を POWER OFF にする。

3 エネルギーギャップの算出

ここで用いた試料はゲルマニウムであり、断面積 S が $1 \times 2 [\text{mm}^2]$ 、電圧端子間距離 l が $10 [\text{mm}]$ である。測定結果を用いて、電気抵抗率 $\rho = RS/l$ の温度変化を方眼のグラフ用紙に描く。次に片対数のグラフ用紙を用い、縦軸に電気抵抗率 ρ 、横軸に絶対温度 T の逆数 ($1/T [\text{K}^{-1}]$) をとりグラフを描く。片対数グラフ上で、抵抗率のデータ点が直線上に乗ることを確かめる。半導体の電気抵抗率 ρ と絶対温度 T の間には、

$$\rho(T) = \rho_0 \exp\left(\frac{\Delta}{2kT}\right) \quad (10.1)$$

の関係がある。ここで k はボルツマン定数で Δ はエネルギーギャップである。式 (10.1) の両辺について自然対数をとると、(ここで $\ln$ は自然対数を意味する。)

$$\ln \rho(T) = \ln \rho_0 + \frac{\Delta}{2kT} \quad (10.2)$$

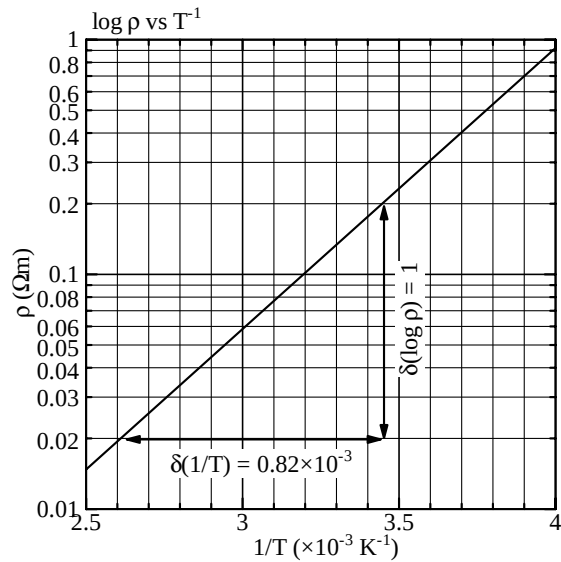


図 10.2: 片対数グラフの使用例

更にこれらの自然対数を常用対数に変換すると、

$$\log \rho(T) = \log \rho_0 + \frac{\Delta}{2k \ln 10} \cdot \frac{1}{T} \quad (10.3)$$

となり、縦軸に $\log \rho(T)$ 、横軸に $1/T$ をプロットすると傾き $\frac{\Delta}{2k \ln 10}$ の直線に乗ることがわかる。以上の方法により、測定結果から、 Δ を求めよ。

4 問題

1. 式 (10.1) から式 (10.3) を導出せよ。
2. 実験から求めたエネルギーギャップ Δ の値を、文献 (理科年表 (国立天文台編、丸善) など) に記載されている値と比較検討せよ。
3. 半導体の電気抵抗率は、温度上昇に従い、減少する。その原因を“キャリアー濃度の温度変化”に基づいて考察せよ。

5 付録 (片対数グラフの使い方)

片対数グラフは、一方の軸の目盛のとり方を工夫することによって、プロットした値を常用対数に変換できるようにになっている。図 10.2 にその一例を示す。片対数グラフの使い方は、以下のとおりである。

- 一番左下の値は必ず 1×10^n (n は整数) で始まる。(例えば、0.01, 10 など)
- 太い軸ごとに 1×10^n ずつ増えていく。(図 10.2 では 0.01 から始まっているので、0.01 ずつ増えていく。)
- 10×10^n まで目盛をふったら、今度は 10×10^n ずつ増えていく。(図 10.2 では、0.1 まで目盛をふったら、それ以降は 0.1 ずつ増える。)
- 対数軸にゼロや負の数をプロットすることはできない。

このグラフから $\log \rho$ vs $1/T$ の傾きを求めるためには、

- 対数軸において、切りのいい増分 (図 10.2 においては、 $\delta(\log \rho) = \log 0.2 - \log 0.02 = \log 10 = 1$) となるところを見つける。
- その増分に相当する横軸の増分を調べる。(図 10.2 では $\delta(1/T) = 0.82 \times 10^{-3} [\text{K}^{-1}]$)
- 傾きは $\frac{\delta(\log \rho)}{\delta(1/T)}$ から求められる。

実験 11 半導体素子の実験

1 目的

最も基本的な半導体素子であるダイオードとトランジスタの静特性を測定し、ダイオードの整流作用、トランジスタの電流増幅作用を理解する。

2 理論

2.1 金属と半導体

金属は、電気伝導を担う多くの自由電子を有し、非常に小さい電気抵抗を示すのに対し、高純度の半導体は自由電子をもたず、大きな電気抵抗を示す。室温での比抵抗は金属で 10^{-5} [Ωcm] 程度、半導体では、 $10^1 \sim 10^{12}$ [Ωcm] 程度であり幅が大きい。これは半導体の電気伝導は、不純物により決まるからである。

2.2 真性半導体、n 型半導体、p 型半導体

典型的な半導体である Si を例にして説明する。Si の各原子は、4 個の価電子を持ち、ダイヤモンド構造を組んでいる。この構造では各原子の最近接に 4 個の Si 原子が囲んでおり、最近接原子同士 1 個ずつ価電子を出し合って、共有結合を作っている。不純物の関与していない半導体を真性半導体といい、伝導の担い手 (キャリア) がないため、電気伝導はほとんど示さない。その概略を図 11.1-(a) に示す。

これに少量 (10^{-5} %程度) の 5 価不純物 (Sb など) を添加すると、図 11.1-(b) のように不純物原子の 5 個の価電子のうち、4 個は結合のために価電子になるが、余分の 1 個の電子は、その不純物の周りにゆるく束縛されて運動する。Sb の不純物原子は、Si の海の中で $+e$ に帯電した陽イオンとなり、これにゆるく束縛されている 1 個の電子は簡単に束縛を切って、電流の担い手 (キャリア) になることができる。このような半導体を n 型半導体という。逆に、3 価の不純物 (In など) を添

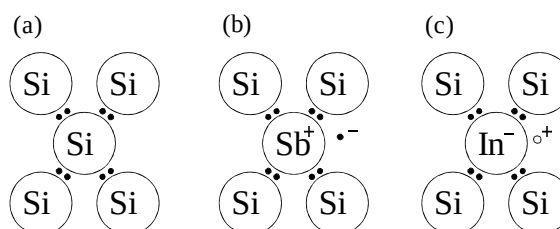


図 11.1: 真性半導体 (a)、n 型半導体 (b)、p 型半導体 (c) の価電子状態の模式図

加すると、図 11.1-(c) のように結合のための価電子が 1 個足りなくなる。電子の 1 個抜けた孔を正孔 (ホール) という。この正孔は、4 つの結合の腕のどこにも入ってもよい。In の不純物原子は、Si の海の中で $-e$ に帯電した陰イオンとなり、正孔はこれにゆるく束縛されて運動する。この正孔も簡単に束縛を切って電流の担い手 (キャリア) になることができる。このような半導体を p 型半導体という。

2.3 ダイオード

n 型半導体と p 型半導体を結合したものをダイオード、或いは、pn 接合 (pn ジャンクション) という。ダイオードの接合部では、キャリアの電子と正孔が互いに拡散し、電子は陰イオンの周りの正孔に入り、正負の電荷を持ったキャリアは中和し消滅してしまう。その結果、図 11.2 に示すように接合部の両側は、キャリアのない領域ができ、電子や正孔が更に移動することを止める障壁 (バリア) ができる。

図 11.3 のように、p 型に正、n 型に負の電圧を印加すると、n 型に電子が注入され、p 型には正孔が注入され接合部でのバリアが低くなり、大量の電流が流れる。この時、電子は右から左へ、正孔は左から右へ流れる。この電流方向を順方向という。逆に図 11.4 のように、p 型に負、n 型に正の電圧を印加すると、初め、p 型に電子が注入され、n 型に正孔が注入され、キャ

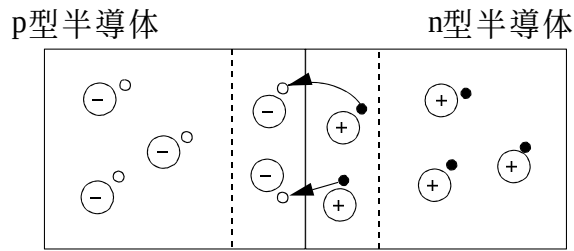


図 11.2: 大きい丸は不純物原子で移動できない。小さい白丸は正孔。小さい黒丸は電子。

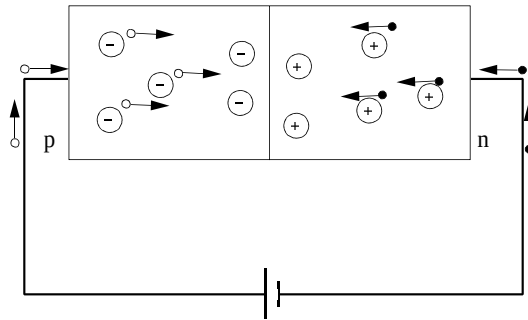


図 11.3: ダイオードに順方向に電圧を印加した場合。

リアが中和され消滅してなくなる。結果的にバリアが高くなり、電流が流れない。この印加電圧方向を逆方向という。

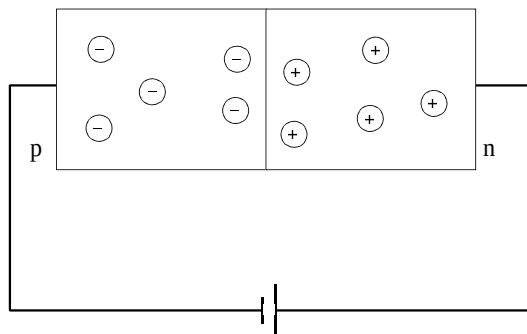


図 11.4: ダイオードに逆方向に電圧を印加した場合。

しかし、更に逆電圧をかけていくと、あるところで急に障壁が壊れ、雪崩的に電流が流れる。この現象をツェナー現象という。一般に、この現象の起こる逆方向電圧はほとんど変わらないので、定電圧特性が得られる。これを利用して定電圧電源の基準電圧に用いられる。このダイオードをツェナーダイオードという。ダイオードのおおよその I vs V 特性と回路素子記号

を図 11.5 に示す。

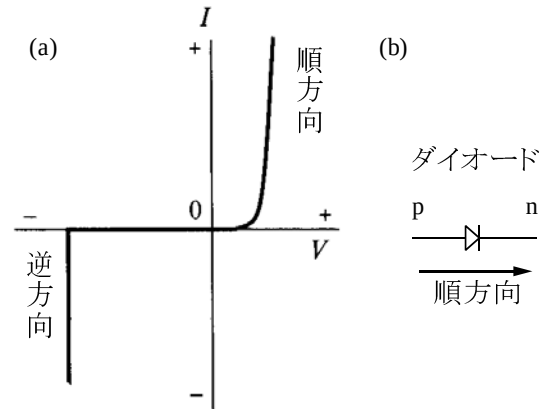


図 11.5: ダイオードのおおよその I vs V 特性 (a) と回路素子記号 (b)。

2.4 トランジスタ

幅の狭い n 型半導体を p 型半導体ではさんだものを pnp 型トランジスタと呼ぶ。中央の領域をベース、両側の領域をエミッタおよびコレクタと呼ぶ。エミッタはキャリアをベース、コレクタに注入するため、不純物濃度を高くしてある。

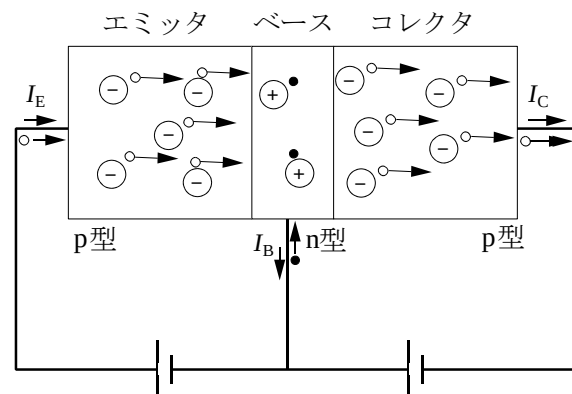


図 11.6: PNP トランジスタの配線図と電子、正孔の流れ。

図 11.6 のように電圧を印加すると、エミッターベース間には順電圧がかかり、大量の正孔がベースに流れ込む。このためエミッタ電流 I_E が流れる。ベースは幅が狭いため、ベースに入った正孔はほとんどコレクタになだれ込みコレクタ電流 I_C になる。ベースに入っ

た正孔の一部は電子と結合して中和し、この電子を補給するために、わずかなベース電流 I_B が流れる。この様子を示したのが図 11.7 である。

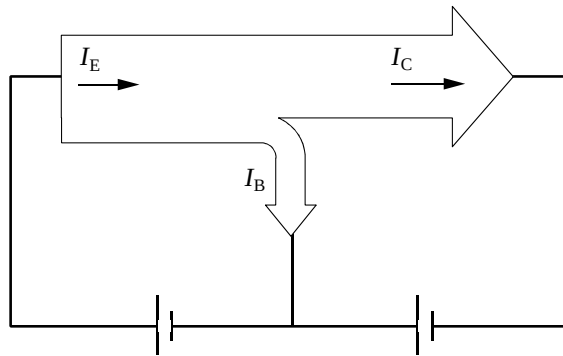


図 11.7: PNP トランジスタに流れる電流量の関係。

I_C は I_B にほぼ比例しており、その比例係数 $h_{FE} = \delta I_C / \delta I_B$ を電流増幅率という。普通 h_{FE} は数百の値を持つ。これをトランジスタの電流増幅作用という。エミッタ-ベース間にゼロ、または、逆方向の電圧を印加すると、 I_E は流れない。従って I_C 、 I_B も流れない。エミッタ-ベース間の電圧をゼロにすると $I_C = 0$ となり、順方向に印加すると I_C に大電流が流れる。このような作用をスイッチングといい、スイッチング作用を利用したトランジスタをスイッチングトランジスタという。

ベース電流 I_B を一定にしたときの I_C とコレクタ-エミッタ間の電圧 V_{CE} とのおおよその関係を図 11.8 に示す。トランジスタの回路素子記号を図 11.9 に示

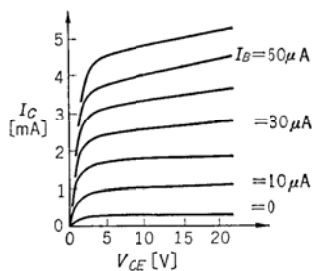


図 11.8: ベース電流 I_B を一定にした時のコレクタ電流 I_C とコレクタ-エミッタ間の電圧 V_{CE} との関係。(必ずしも実験値がこの通りになるとは限らない。)

す。npn 型トランジスタは pnp 型と比べて p 型と n 型半導体を入れ替えたものである。

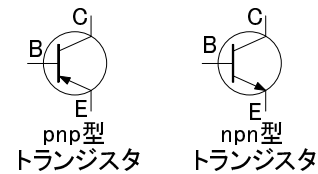


図 11.9: 2 種類のトランジスタの回路素子記号

3 実験

3.1 ダイオードの電流-電圧特性の測定

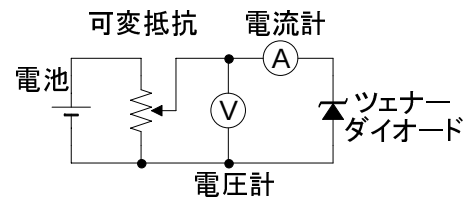


図 11.10: ツェナーダイオードに逆方向の電圧を加えたときの回路図

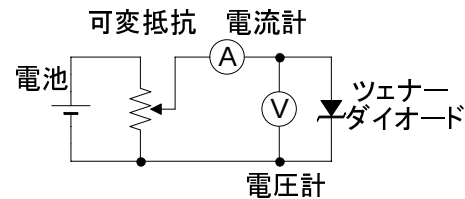


図 11.11: ツェナーダイオードに順方向の電圧を加えたときの回路図

- 図 11.10 の測定回路を組んで、まず逆方向の電圧を印加した場合の電流-電圧特性を調べよ。ダイオードには、ツェナーダイオードを使用せよ。測定しながら、すぐにグラフ化せよ。
- 次に、図 11.11 のように測定回路を変えて、順方向の電流-電圧特性を調べよ。順方向の場合、電流は 30 mA までとせよ。また、電流計の最高を越えないように注意せよ。

3.2 ダイオードの整流作用の観察

- 図 11.12 の回路でダイオードの整流作用をオシロスコープで観察せよ。ダイオードとしては、整流

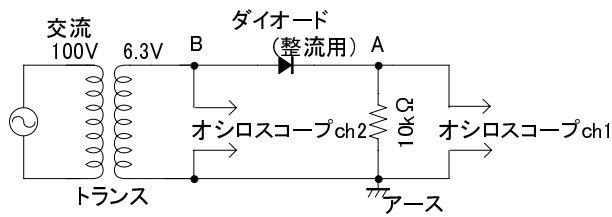


図 11.12: 整流用ダイオードの整流作用を調べるための回路図

用ダイオードを使用せよ。

2. 現象オシロスコープで A 点、B 点の電圧波形の時間依存性を比較し、波形を図示せよ。

注 回路とオシロスコープの 2 つのチャンネルのアースを一致させること。また、【TIME/DIV】や【VOLT/DIV】近くにある VARIABLE つまみを時計回りに回し切ること。

3.3 エミッタ接地の場合のトランジスタの静特性の測定

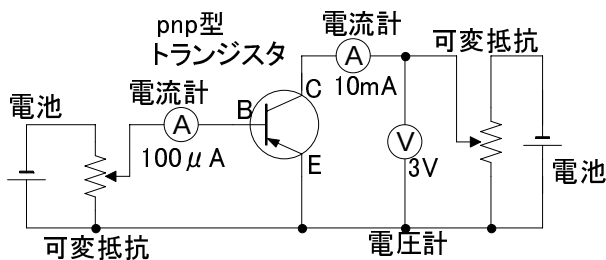


図 11.13: エミッタ接地の PNP トランジスタの静特性を調べるための回路図

1. エミッタ接地における I_C vs V_{CE} 特性を得るために、図 11.13 のような回路を組む。 I_B の測定には、 μA 計の $100 \mu A$ レンジ、 I_C の測定には、mA 計の $10 mA$ レンジ、 V_{CE} の測定には、電圧計の $3 V$ レンジを使用せよ。パネル上にある I、II、OFF の切り替えスイッチは I のままにしておくこと。
2. I_B を一定にして、 I_C vs V_{CE} 特性を測定し、グラフに描け。 I_B として、 $0 \mu A$ 、 $20 \mu A$ 、 $40 \mu A$ 、お

よび $60 \mu A$ の数種類について測定し、一枚のグラフ用紙に重ねて描け。

3. 測定したトランジスタのデータから、 V_{CE} : 一定にした時 (例えば、 $V_{CE} = 2 V$ に固定した時) の I_C vs I_B をグラフに描き、電流増幅率 h_{FE} を求めよ。(ヒント : h_{FE} はこのグラフの傾きに等しい。)

(注意)

1. 測定は敏速に行うこと。特に電流が大きくなると熱を発生し、特性が変わることがある。
2. 電流計、電圧計のメーターの最高を越えないように注意せよ。
3. 極性を間違えないように注意せよ。
4. ダイオード、トランジスタをソケットから取り出すときは、電圧を必ずゼロにしてから行うこと。
5. それぞれの素子の最大定格を越えないように注意せよ。
6. V_{CE} を変えたときの I_B の変化は無視してよい。

4 課題

1. ダイオードの電流-電圧特性を得るとき、順方向と逆方向で測定回路を変えたのはなぜか。(ヒント : 電流計、電圧計の内部抵抗の大きさについて考えてみる。)

実験12 フランクヘルツの実験

1 目的

希ガス原子に電子を衝突させて原子の励起エネルギーを測定し、エネルギー準位が離散的であることを理解する。(参考：1914年 J. Frank と G. Hertz は原子構造に関するボーア (Niels-Bohr) の量子論を実験で立証した。この実験は量子物理の発展に大きな貢献をしたため、1925年にノーベル賞が送られた。)

2 測定原理

ボーアの原子理論によれば、原子の定常状態のエネルギーは離散的であり、最もエネルギーの低い状態を基底状態、1つ上の定常状態を第一励起状態という。第一励起状態と基底状態のエネルギー差を ΔE としよう。加速された電子が原子ガスに衝突する場合、電子のエネルギーが ΔE より小さければ、電子は原子と弾性衝突を繰り返すのみで運動エネルギーは殆ど変わらない。しかし、電子のエネルギーが ΔE を越えると、電子と原子の衝突により、原子は第一励起状態に励起され、電子はそれに対応した運動エネルギーを失う。このような非弾性衝突により、電子のエネルギーが減少すると同時に、原子からは第一励起状態から基底状態への遷移に伴う発光が観測される。図のようにカソード C を出た電子はグリッド G1 で加速され、G1-G2 間で管中の希ガス原子と衝突する。G2 とプレート P 間には逆電圧が印加されている。C-G2 間の電圧が低ければ電子と原子は弾性衝突をし、電子は運動エネルギーを殆ど変化させず、プレートに到達する。プレート電流は印加電圧と共に増加する。しかし、印加電圧を増し電子の運動エネルギーが ΔE を越えると、原子を励起する衝突が起こり、電子は ΔE に対応する運動エネルギーを失い、G2-P 間の逆電圧のためプレートに到達できない。このため電流は減少する。この時の電圧を V_1 とする。印加電圧を増加し続けるとプレート

電流は再び増加するが、電圧が V_1 の2倍を越えると電子は原子と2回衝突して運動エネルギーを失い、再びプレート電流は減少する。この時の電圧は V_2 である。以下同様な過程が繰り返される。原子の励起エネルギー ΔE は

$$\Delta E = e(V_{i+1} - V_i) \quad (12.1)$$

で与えられる。単位は [eV] (エレクトロンボルト) である。

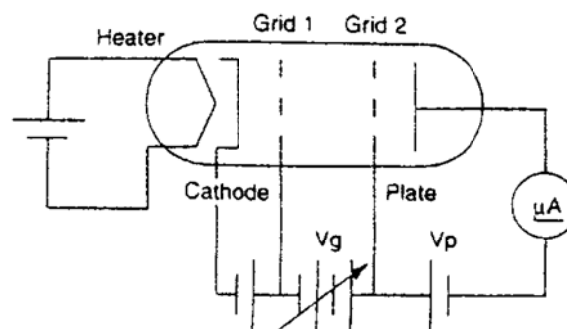


図 12.1: ブロック図

3 実験

1. 図 12.1 を参照し、フランクヘルツ実験装置と各端子に直流電流計 [mA] ⑨、デジタルマルチメータ⑦、直流電流計⑧ [μA] を接続する。⑧は最初 30 のレンジにし、オーバーすることがあればレンジを替える。
2. 押しボタンスイッチ②が、Inert Gas に設定されていることを確認する。ACC. V. REG③と H. CUR. ADJ⑥のヒーター電流のボリュームつまみを左にいっぱい回しておく。
3. POWER スイッチ①を ON にする。μA OADJ⑤で直流電流計⑧の値をゼロに近づける。(V_p の調整)

- H. CUR. ADJ⑥を回して直流電流計⑨を 740 mA にセットする。
- 約 3 分後本体が安定した後、ACC. V. REG③をゆっくり右に回しながら、直流電圧計⑦で 2 V ごと (ただし、ピークに近い所は電圧の刻みを細かくとること) 75 V まで変え、直流電流計⑧の電流値を記録する。この時方眼紙にすぐグラフ化する。
- デジタルマルチメータ⑦は加速電圧 V_g 、直流電流計⑧はプレート電流 I_p を示している。引き続き H. CUR. ADJ⑥を 750mA、760mA にして、 $V_g - I_p$ 特性直線を 3 回測定する。

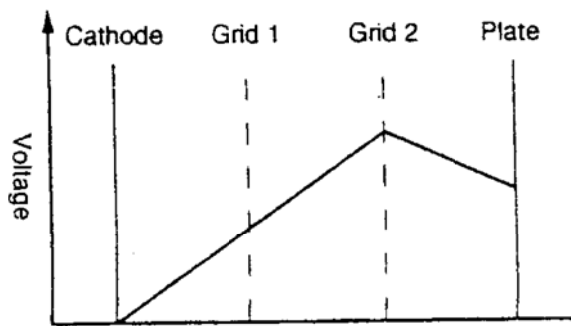


図 12.2: 電極の電位分布

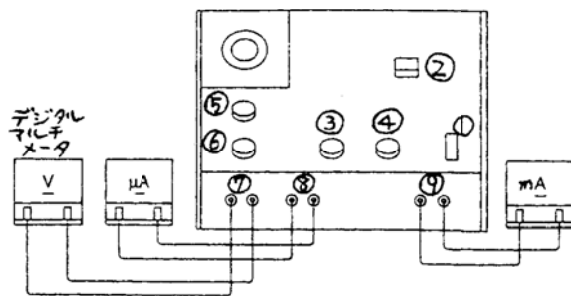
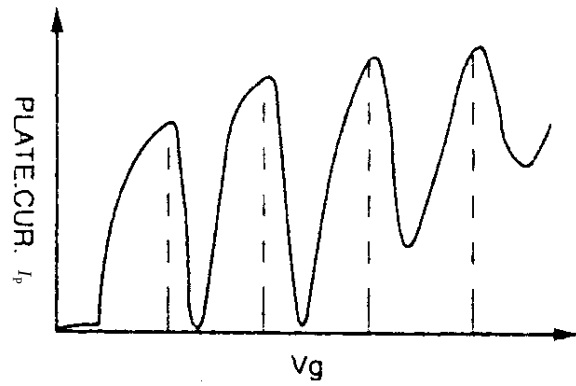


図 12.3: 配線図

図 12.4: $V_g - I_p$ 特性曲線

$V_3 - V_1$, $\Delta V_2 = V_4 - V_2 \dots$ のように求める。励起電圧をこれらの平均値の $1/2$ とみなし値を求めよ。第一ピーク電圧と励起電圧との差を接触電位差という。

- 表 12.1 の備考を参考にし励起電圧の値から、この管球内の希ガスの種類を推定せよ。
- 励起電圧から発光する光の波長を計算せよ。

表 12.1: 備考

原子	He	Ne	Ar
最小励起電圧 (V)	21.2	16.7	11.6

[注意] 放電が起こると直流電流計が大きな値を示すので、直ちに ACC. V. REG③と H. CUR. ADJ⑥をゼロにする。放電が続くと管球を破損する。

4 解析

- プレート電流のピーク時における加速電圧を V_1 , V_2 , $V_3 \dots$ とし、これから加速電圧の差を $\Delta V_1 =$

実験13 光電効果

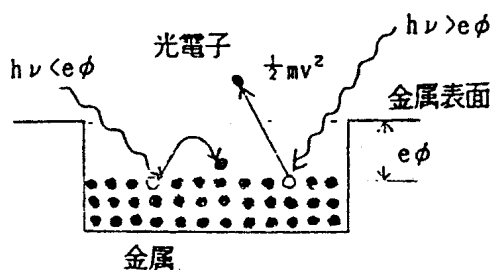


図 13.1: エネルギー図

1 目的

光電効果の実験から、プランク定数を算出する。

2 理論

2.1 光電管

光電効果

金属に光 (電磁波) を照射すると金属の表面から電子が放出される。この現象を光電効果といい、この電子を光電子という。照射した光の振動数を ν 、放出された光電子の最大の運動エネルギーを $\frac{1}{2}mv^2$ とすると、

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + e\phi \quad (13.1)$$

が成り立つ。ここで、 h はプランクの定数である。また、 $e\phi$ は、光電子が金属の外に飛び出すに必要なエネルギーであり、仕事関数 (work function) と呼ばれている。図 13.1 に示す様に、光のエネルギー $h\nu$ が仕事関数 $e\phi$ より大きい時に、光電子が金属の表面から放出される。 $h\nu$ が $e\phi$ より小さい時は光電子の放出は起らない。

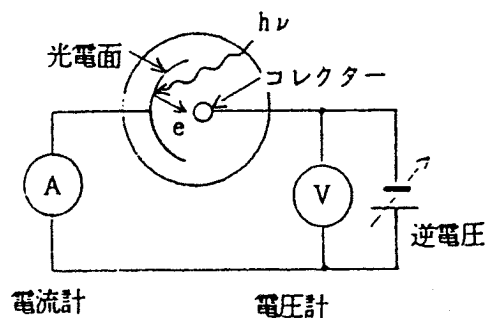


図 13.2: 光電管

2.2 光電管

光電管は、図 13.2 に示すように、光電子を放出しやすい金属で作られている光電面と、その光電子を集めるコレクター (陽極) よりできている。この実験で使われる光電面は、Sb-Cs の活性物質で出来ており、その仕事関数は 2 eV 以下である。

2.3 阻止電圧

光電子の検出には、通常、コレクター側にプラスの電圧を印加し、流れる電流を検出する。この電流を光電流という。今回の実験では、コレクター側にマイナス (-) の電圧を印加し、飛び出した光電子 (-e) を妨害する。従って、光電流は減少し、図 13.3 に示すような光電流と印加電圧の関係が得られる。

光電流がゼロとなる場所の逆電圧を、阻止電圧という。阻止電圧によるポテンシャルエネルギーを eV とすると、このポテンシャルの山を登ることにより光電子の最大の運動エネルギーがゼロになる。従って、

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV \quad (13.2)$$

の関係から、阻止電圧 V と光の振動数 ν との関係式

$$eV = h\nu - e\phi \quad (13.3)$$

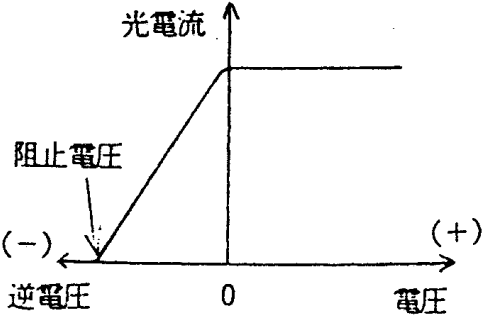


図 13.3: 光電流と印加電圧の関係

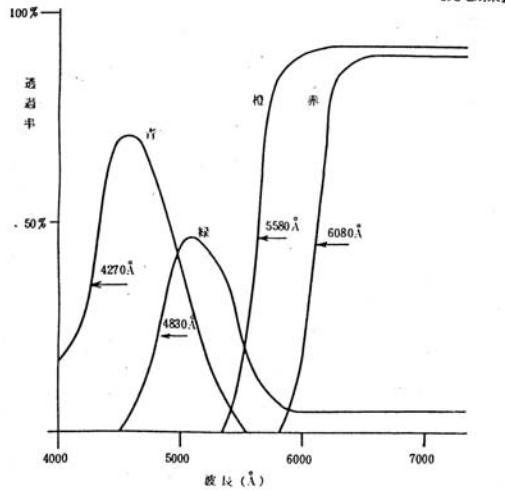


図 13.4: フィルター特性

表 13.1: 光の波長		
フィルター	波長 λ (nm)	振動数 ν (Hz)
赤	608	4.93×10^{14}
橙	558	5.37×10^{14}
緑	483	6.21×10^{14}
青	427	7.02×10^{14}

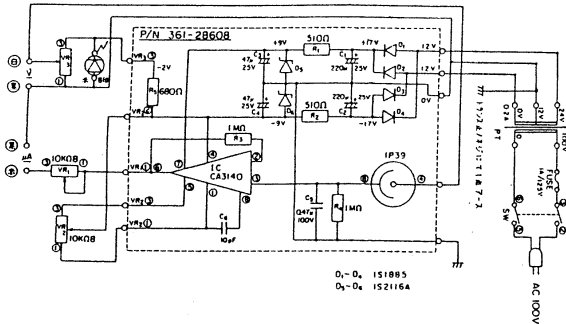


図 13.5: 光電効果測定装置の電気回路

3.2 電気回路

光電効果測定装置の電気系統の回路図を図 13.5 に示す。光電流は抵抗 R_4 の電圧降下を直流増幅回路 (IC3140) を通して電流計に通す。実験では、直流増幅器のバランス (ゼロ点調整 VR_2) と増幅率 (VR_1) の 2 つを調整する必要がある。

4 実験

4.1 実験の準備

- (1) 光源は受光面から約 10cm 離して置き、コード中間にあるスイッチが切れていることを確認後、100V 電源につなぐ。
- (2) 光電効果測定装置の電流計接続端子を電流計につなぎ、電圧計接続端子を電圧計につなぐ。
- (3) 電源スイッチを入れる前に、

- 【Gain Cont.】ツマミを反時計方向へいっぱい回し、直流増幅器の増幅度を最小にする。
- 【Zero Adj.】ツマミをはぼ中央におき、直流増幅器のバランスを仮に設定する。

3 装置

光電効果測定装置 (光電管、電気回路)、光源 (白熱電球)、フィルター (4 枚)、電流計、電圧計、ドライバー

3.1 フィルターの特性

単一の波長を有する光 (単色光) を得るために、ここでは、白熱電球から出る光をフィルターを通すことにより近似的に単色光を得る。4 枚のフィルターの特性を図 13.4 に示す。それぞれの光の波長は、透過率が 1/2 になる短波長側の波長とする。それらを表 13.1 に示す。

- 【Collector Voltage】ツマミは反時計方向へいっぱいに戻し、光電管に印加する逆電圧をゼロボルトにする。電圧計を見ればわかる。

(注1) 【Gain Cont.】は gain controller の略で、直流増幅器の増幅度を制御するツマミである。

(注2) 【Zero Adj.】は zero adjustment の略で、直流増幅器のバランスを取り、ゼロ点の調整をするツマミである。

(注3) 【Collector Voltage】はコレクターに印加する電圧の調整ツマミである。

4.2 光電流と逆電圧の関係の測定

- (1) 受光窓に、まず、4枚のフィルターのうち1枚をいれる。

(注) フィルターなしで、直接 光電面に光をあてないこと。

- (2) 電源スイッチを入れる。
- (3) 【Zero Adj.】ツマミを左右に回して、電流計のゼロ点を合わせる。増幅器が動作していることが確認できる。
- (4) 光源のスイッチを入れ、白熱電球を点灯させよ。この時、電流計の針が振れ、光電流が流れていることが確認できる。
- (5) 【Gain Cont.】ツマミで増幅度を上げ、電流計の電流が $100\mu\text{A}$ になるように調整せよ。このツマミを最小にしても $100\mu\text{A}$ 以上になる場合は、光源を少し離してから、再度、調整する。
- (6) 【Gain Cont.】を調整すると、多少、増幅器のバランスが崩れる場合があるので、再度光源を切り、操作(3)に戻って【Zero Adj.】ツマミを調整する。より精度を上げたい場合は、操作(3)から(6)を繰り返す。
- (7) コレクターに逆電圧をかけるために【Collector Voltage】ツマミを右に回していき、各逆電圧に対する電流値を記録する。
- (8) 得られたデータは直ちにグラフに描け。図 13.3 の左側の部分が得られるはずである。

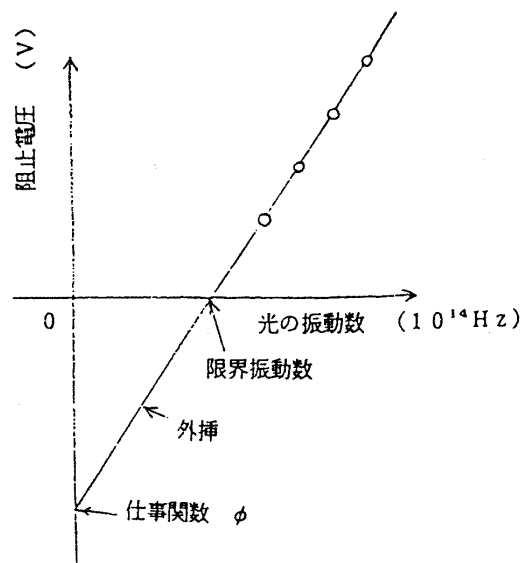


図 13.6: 阻止電圧と光の振動数の関係

- (9) グラフが得られたら、各ツマミを元の位置に戻し、光源を消してから、フィルターを取り替える。操作(1)に戻って、残りの3枚のフィルターに対して繰り返す。

4.3 阻止電圧の算出

- (1) 前の実験データから阻止電圧が得られるはずであるが、このグラフは図 13.3 に示す様になっておらず、電流値ゼロの電圧値を決めるのは多少困難である。ここでは、仮に、電流値が $2\mu\text{A}$ の時の電圧値を阻止電圧として、それぞれの光に対する阻止電圧を求めよ。
- (2) 阻止電圧を縦軸に、光の振動数を横軸にして、4つのデータ点を記入せよ。図 13.6 に示すようなグラフが得られる。
- (3) このグラフの y 切片から仕事関数 ϕ を、 x 切片から限界振動数を求めよ。
- (4) このグラフの傾きからプランク定数 h を求めよ。

5 考察

- (1) プランク定数の真の値は $6.626 \times 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}]$ であるが、この実験の方法では真の値の $2/3$ 程度になっていると思う。考えられる原因を箇条書にせよ。
- (2) それらの原因に対する対策を記せ。また、すぐに改良が可能と考えられるものは改良を試みよ。

実験14 地磁気の測定

1 目的

1. 磁気モーメント M の棒磁石の中央をつるして水平分力 H 中で振動させ、その周期から MH を求める。
2. 磁力計のふれから M/H を求める。
3. 上の結果から地磁気の水平分力 H と棒磁石の磁気モーメント M を算出する。

2 理論

2.1 MH を求める実験

図 14.1 に示すように、長さ l 、両端の磁荷量 $\pm m$ [Wb] の棒磁石をねじり力のない細い糸で水平に吊るし、棒磁石の軸が地磁気の水平分力 H [A/m] と小角 ϕ を作るとき、これに作用する偶力のモーメントの大きさは

$$mH \sin \phi \cdot \frac{l}{2} \cdot 2 = mHl \sin \phi \cong MH\phi$$

ただし、 $ml = M$ は棒磁石の磁気モーメントを表し、 ϕ は十分に小さいとして $\sin \phi \cong \phi$ と置いている。よって、棒磁石の中心 O を通る鉛直軸まわりの回転運動の方程式として、

$$I \frac{d^2 \phi}{dt^2} = -MH\phi$$

$$\therefore \frac{d^2 \phi}{dt^2} = -\frac{MH}{I} \phi \quad (14.1)$$

ここで、 ϕ が増える方向を正にとった。また、 I は O を中心軸とする棒磁石の慣性モーメントである。式 (14.1) は ϕ に対する単振動の微分方程式であり、その角振動数を ω [rad/sec]、周期を T [sec] とおくと

$$\omega^2 = \frac{MH}{I} \quad \therefore T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{MH}}$$

$$\therefore MH = \frac{4\pi^2 I}{T^2} \equiv A \quad (14.2)$$

この実験では、質量 M_0 [kg]、長さ l [m]、断面の一边 b [m] の正角柱の棒磁石を用いるので、慣性モーメント I は

$$I = M_0 \left(\frac{l^2}{12} + \frac{b^2}{12} \right) [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (14.3)$$

で求められる。よって、周期 T を測定すれば MH の値を求めることができる。

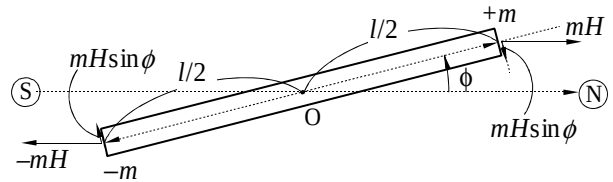


図 14.1: 棒磁石に作用する地磁気による偶力のモーメント

2.2 M/H を求める実験

次に図 14.2 のように、磁気モーメント $M = ml$ [Wb·m] の図 14.1 と同じ棒磁石の軸を東西に置くと、その中心 O から r [m] の距離の軸上の一点 O' におけるその方向の磁場の強さは

$$H' = \frac{1}{4\pi\mu_0} \left\{ \frac{m}{(r-l/2)^2} - \frac{m}{(r+l/2)^2} \right\} \quad (14.4)$$

$$= \frac{2mlr}{4\pi\mu_0(r^2 - l^2/4)^2} \quad (14.5)$$

$$\cong \frac{2M \times 10^7}{(4\pi)^2 r^3} [\text{A/m}] \quad (14.6)$$

ただし、 $r \gg l$ であり、 μ_0 は真空の透磁率 ($4\pi \times 10^7$ [H/m])、空気の透磁率は真空の透磁率にほぼ等しいと考える。

従って、磁極の強さ m' の小磁針を細い針の上 O' にバランス良く乗せた時、これに作用する力は軸方向に

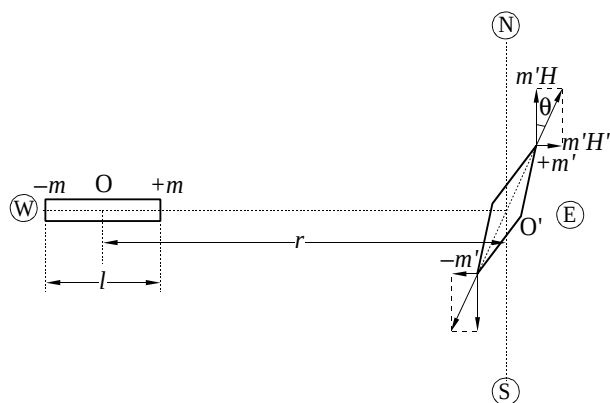


図 14.2: 棒磁石を方位磁石に近づける時の影響

$m'H'$ [N]、軸と垂直方向に $m'H$ [N] である。ここに H [A/m] は地磁気の水平分力で、それと磁針となす間の角を θ とおくと

$$\tan \theta = \frac{m'H'}{m'H} = \frac{H'}{H} = \frac{2 \times 10^7}{(4\pi)^2} \cdot \frac{M}{H} \cdot \frac{1}{r^3} \quad (14.7)$$

すなわち、 $\tan \theta$ と $1/r^3$ の間には比例関係が成り立ち、その比例係数から M/H を求めることができる。

3 実験

長い棒磁石、短い棒磁石、それぞれについて以下の実験を行う。

3.1 MH を求める。

目的の 1 を行う。図 14.3 に示すように 棒磁石をね

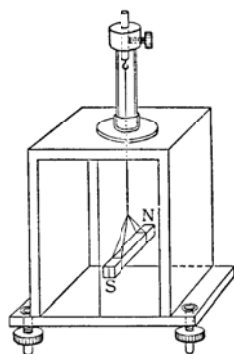


図 14.3: 棒磁石の振動周期を測定する装置

じれのない絹糸につるし、ガラスの扉を閉め、南北方

表 14.1: 棒磁石を振動周期を記録した例 (実際の実験がこの通りになるとは限らない。)

回	時刻	回	時刻	50 周期
0	2 分 16.3 秒	50	5 分 10.9 秒	2 分 54.6 秒
5	2 分 36.6 秒	55	5 分 30.3 秒	2 分 53.7 秒
10	2 分 55.3 秒	60	5 分 49.7 秒	2 分 54.4 秒
15	3 分 15.4 秒	65	6 分 09.1 秒	2 分 53.7 秒
20	3 分 34.7 秒	70	6 分 28.5 秒	2 分 53.8 秒
25	3 分 53.6 秒	75	6 分 47.9 秒	2 分 54.3 秒
30	4 分 13.9 秒	80	7 分 07.3 秒	2 分 53.4 秒
35	4 分 31.7 秒	85	7 分 26.7 秒	2 分 55.0 秒
40	4 分 51.4 秒	90	7 分 46.1 秒	2 分 54.7 秒
45	5 分 10.6 秒	95	8 分 05.5 秒	2 分 54.9 秒

平均 2 分 54.2 秒

よって、平均周期 $T = 3.484$ 秒

向を向かわせ振動のない静かな状態にする。次に鉄片あるいは磁石を近づけ、振幅の小さい振動を与える。この実験では木箱を上から眺めて棒磁石が線上を通過する時刻を記録する。表 14.1 に示すように棒磁石が線上を 5 回づつ通過するときの時刻を記録し、50 周期の時間を計算できるように表にする。スタート時刻は 0 回の時ストップウォッチをスタートさせるのではない。時計を先にスタートさせ、また棒磁石を適当に振らせておき、棒磁石が線上を通過したある時を 0 回として時刻を記録する。各 50 周期の時間の平均を取り、更にこの平均値を 50 で割って平均周期 T を求める。

ここで棒磁石の重さ M_0 は

長い棒磁石 : 73.08 g, 短い棒磁石 : 36.73 g

である。長さ l 、断面の一边の長さ b はノギスで測定する。以上の実験値と式 (14.2)(14.3) を用いて棒磁石の磁気モーメントと地磁気の水平分力の積 MH が求められる。単位は MKS で行うと MH [N・m] となる。

[参考] ストップウォッチの使い方

黒いカバーに入れてあるストップウォッチは赤いボタンの MODE を押し、SPLIT 状態にする。この状態で LAP/SPLIT の黒いボタンを押すごとに、押したときの時刻 (スプリット) が上の段に表示される。青いカバーに入っているストップウォッチは、START ボタ

ンを押し LAP・RESET ボタンを押すと、LAP という文字が点滅し押したときの時刻が表示される。この時、時計内部では時間が動いており、再度 LAP・RESET ボタンを押すと最初からの経過時間が表示される。最終的に時計を止める時は START・STOP ボタンを押し、次に RESET ボタンを押すと時計は止まる。これはどのストップウォッチも同じである。

3.2 M/H を求める。

目的の 2 を行う。まず準備として木製偏角磁力計 (以下、磁力計) の調節を行う。図 14.4 に磁力計の全体図を示す。TA または教官から小磁針を借り、図 14.5 に示すように磁針止め針の上に乗せる。図 14.6 に示す水平調節脚のネジで磁力計が水平になるようにし、小磁針が自由に動くように調節する。図 14.7 のように磁力計のレール溝が東西方向を向くようにする。小磁針については、色の付けてない棒状の物が磁石であり、これが南北を向く。従って色の付けてある針が東西方向を向くことになる。また小磁針はゆらゆらと揺れる状態がよく、動きがすぐ止まる状態はよくない。

棒磁石を移動レールの上に乗せて、小磁針との距離 r を変化させて、小磁針の針の東西方向からのずれ角 θ を記録せよ。更に、横軸を $1/r^3$ 、縦軸を $\tan \theta$ にとり、グラフにしてみよ。このグラフは $r \gg l$ で原点を通る直線となるはずである。この直線の傾きが

$$\frac{2 \times 10^7}{(4\pi)^2} \cdot \frac{M}{H}$$

に等しいとおいて、 M/H が求められる。単位は MKS で行う。その場合 M/H [Wb・m²/A] となる。

3.3 M と H を求める。

3.1 と 3.2 から MH と M/H が求まったので、 M [Wb・m] と H [A/m] を算出せよ。レポートには 3.2 のグラフも添付すること。

[参考] 理科年表 (2002 年版) によると、地磁気および重力の項に富山県の氷見の水平分力は 30206 nT = 0.302 Gauss と出ている。求めた水平分力 H [A/m] に $4\pi \times 10^{-3}$ を掛けると Gauss 単位に換算できる。比較してみよ。

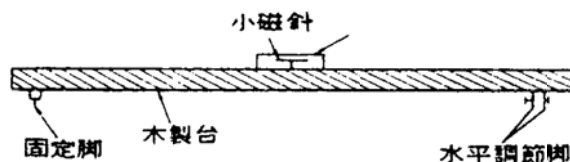


図 14.4: 偏角磁力計の全体と磁針計

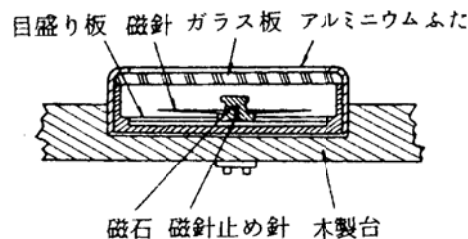


図 14.5: 偏角磁力計の断面

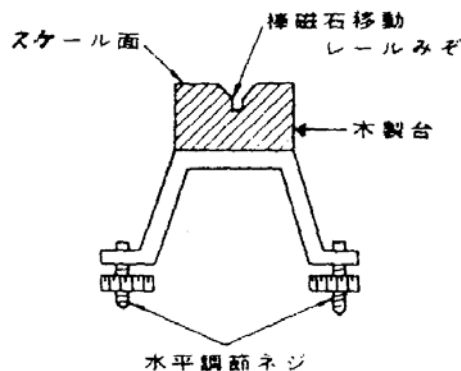


図 14.6: 偏角磁力計の調節ネジ

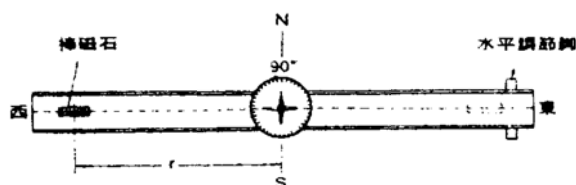


図 14.7: 偏角磁力計に棒磁石を乗せた様子

実験15 クント (Kundt) の実験

1 目的

クントの実験によって、(1) 発した音の振動数、(2) 棒中の縦波の速度、(3) 棒のヤング (Young) 率、の測定をする。

2 原理

音が棒を伝わる時の縦波の速度 V と、そのヤング率 E 、およびその密度 ρ との関係を導くために図 15.1 に示すように、棒の長さの方向に x 軸をとり、その長さ dx 、断面積 S の部分を考える。いま、縦波のため

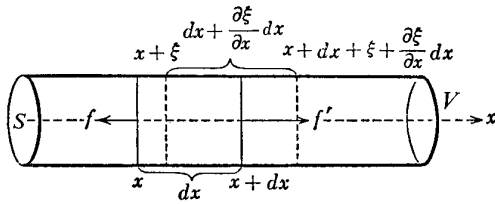


図 15.1: 棒を伝わる縦波 (音) の様子

x の点が $x + \xi$ に、 $x + dx$ の点が $x + dx + \xi + \frac{d\xi}{dx}dx$ に変位したとすれば、密度 ρ は $\rho + d\rho$ と変化しても、その質量 m は一定であるから、

$$m = \rho S dx = (\rho + d\rho) S \left(dx + \frac{d\xi}{dx} dx \right) \quad (15.1)$$

また、 x 点の S 面に作用する力を f とすれば、Young 率の定義から

$$E = \frac{\frac{f}{S}}{\left(dx + \frac{d\xi}{dx} dx \right) - dx} = \frac{f}{S \frac{d\xi}{dx}} \quad (15.2)$$

$$f = ES \frac{d\xi}{dx} \quad (15.3)$$

したがって、 $x + dx$ 点の S 面に作用する力 f' は、

$$f' = ES \left(\frac{d\xi}{dx} + \frac{d^2\xi}{dx^2} dx \right) \quad (15.4)$$

ゆえに、力 $f - f'$ のために、質量 m に $\frac{d^2\xi}{dt^2}$ の加速度が生じることになるから、Newton の運動方程式は、

$$\rho S dx \frac{d^2\xi}{dt^2} = ES \left(\frac{d\xi}{dx} + \frac{d^2\xi}{dx^2} dx \right) - ES \frac{d\xi}{dx} \quad (15.5)$$

$$\frac{d^2\xi}{dt^2} = \frac{E}{\rho} \frac{d^2\xi}{dx^2} \quad (15.6)$$

これは、 x 軸の方向に伝わる縦波の方程式で、その伝播速度は

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (15.7)$$

3 実験

3.1 クントの実験

(1) コルクを手動式のグラインダーで粉末にする。ガラス管内が乾燥していることを確認し、コルクの粉末をガラス管内に薄く一様に散布する。あまり多く入れると実験はうまくいかない。そのガラス管を支持台 (図 15.2 の⑤) に載せ、支持用パネで固定する。次に図 15.3 に示すようにガラス管をセットする。まず支持台に載せたガラス管を実験台の上に水平に置き、試料棒 3 の長さ L を測った後、棒の一端のコルク板をガラス管の約 10 cm ほど差し入れ、コルク栓を止める。次にガラス管を割らないように注意して、棒の中央を万力で実験台に強く固定する。他の一端に調節板④を差し入れ、その柄につけられたコルク栓を止める。

(2) 以上の準備が終わったら、アルコールをガーゼまたは綿布につけ、それで棒を図 15.3 の CB の中央部から、B 端に向かって一方向のみ摩擦して高音が発するように棒を振動させる。この時、調節板④の位置を移動させ、管内のコルクの粉末が最も激しく振動する位置を探し、粉末が規則正しく縞状に並ぶまで棒を摩擦する。摩擦の仕方はあまり強くゆすらず、棒の縦振動を助ける気持ちで適当な速さでこする。

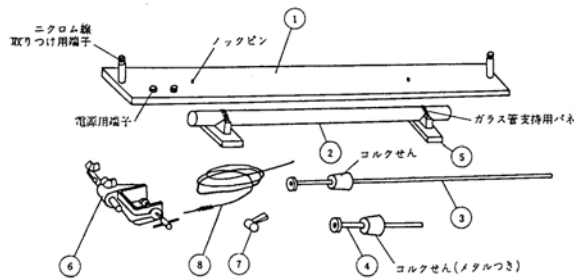


図 15.2: 装置内容図

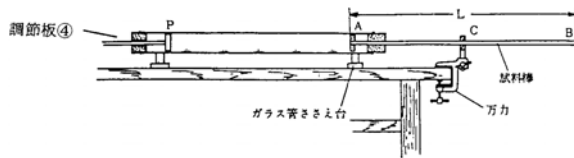


図 15.3: 装置の取り付け方

(3) 図 15.4 に示すような縞が生じたら解析をおこなう。図において $N_1, N_2, N_3, \dots$ は定常波節を表し、 $L_1, L_2, L_3, \dots$ はその腹を表す。従って節間、または腹間を測れば管内の音波の波長が分かる。ここで求めるものは

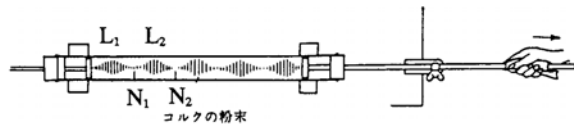


図 15.4: コルク粉末の定常波のでき方

管内の音波の波長 λ' 、棒中の縦波の速度 V' 、Young 率 E である。求め方は教科書にも書いてあるがここにも書き記す。節点の位置を物差しで測り、 $x_0, x_1, x_2, \dots$ を得る。この x の値を教科書の例に示すように $2\lambda'$ の 2 組に分けて差をとって平均値を求めれば、ガラス管内の音波の波長 λ' が分かる。また温度計によって気温を測定して $t^\circ\text{C}$ とすれば、その温度における音の空気中を伝わる速度 V' は

$$V' = 3.314 \times 10^2 (1 + 0.00183t) \text{ [m/s]} \quad (15.8)$$

で求められる。ゆえに、発した音の振動数 ν' は

$$\nu' = \frac{V'}{\lambda'} \text{ [Hz]} \quad (15.9)$$

となる。ところで、棒に生じた縦波の振動数 ν は、共鳴の場合だから $\nu = \nu'$ であって、棒に生じた定常波

の基本音の波長 λ は、棒の長さを L とすれば、

$$\lambda = 2L \quad (15.10)$$

ゆえに、棒中の縦波の速度 V は

$$V = \lambda \nu = \frac{2LV'}{\lambda'} \quad (15.11)$$

と求められる。

棒の Young 率を $E \text{ [dyn/cm]} (= \times 10^{-1} \text{ [N/m}^2])$ 、密度を $\rho \text{ [g/cm}^3] (= \times 10^3 \text{ [kg/m}^3])$ とすれば、次のようになる。

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (15.12)$$

$$E = V^2 \rho \text{ [dyn/cm}^2] (= 10^{-1} \text{ [N/m}^2]) \quad (15.13)$$

ここで棒の密度 ρ は $8.44 \text{ [g/cm}^3]$ とする。

3.2 笛の音波と定常波の観察

ニクロム線の一方の端の銅線部を波長調節棒 (図 15.5 の 1) のパイプの中を通して木製台のターミナル A につける。スプリングの方は、ガラス管を通してターミナル B につける。このときニクロム線が緊張するように調節し、波長調節棒は、軽く移動できるか調べる。次に可変変圧器を用い、その 2 次側を木製台の電源ターミナルに連結して、ボルト調節がゼロになっていることを確認してから 1 次側をコンセント 100V に連結する。この順番を間違えると 2 次側でショートしやすい

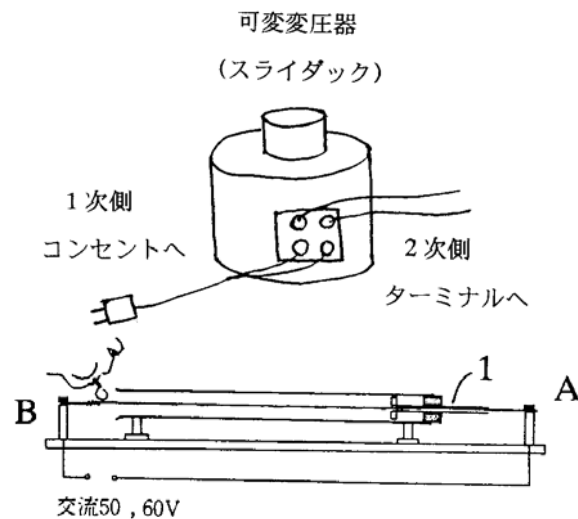


図 15.5: 音波の観察

ので注意すること。ボルト調節は 0 ボルトよりだんだん上げて 50～60V ぐらいでニクロム線が赤熱状態になるので、その程度で止める。**あまり電圧を上げるとニクロム線が切れることがあるので注意すること。**次に端子 B 側のガラス管口の位置で笛を吹き鳴らしながら、波長調節棒を少しずつ移動させると、ニクロム線上に明暗の縞が見られるように調節することができる。笛を吹くと音波が B 口より、調節棒の金属版に達し反射されるために、行きと帰りの波で定常波ができる。このとき定常波の腹部と節部の空気の動きを考えて、なぜニクロム線の上に明暗の縞が見られるかを考えレポートにせよ。

3.3 交流の定常波の観察

木製台よりガラス管を取り外し、両端のターミナルにニクロム線を引っ張り、電源に連結して 3.2 と同様にする。電圧はやはり 50～60V ぐらいにしニクロム線

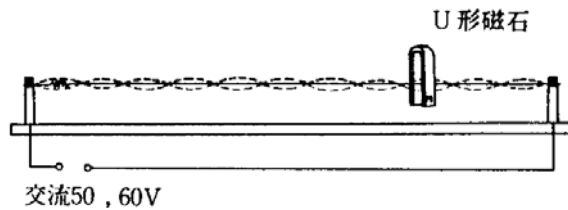


図 15.6: 装置の取り付け方

を赤熱状態にする。次に U 字形磁石を図 15.6 のように銅線部にまたがらせ、ニクロム線の張力と U 字形磁石の位置を調節すると、定常波ができる。これは磁石の磁界内を交流が通るので、フレミングの法則により磁界の中の銅線には交流の周波数に等しいだけの振動がおき、この振動数と線の長さ及び張力によって定まる振動波とが一致するからである。なお張力ならびに磁石の位置を変えると、波形の変わった定常波を観察できる。その様子をレポートに記述せよ。